



Klimaneutrale synthetische Kraftstoffe im Verkehr

Potenziale und Handlungsempfehlungen



Impressum

Herausgeber Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verbrennungstechnik (VT)
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Autoren Thomas Bierkandt
Michael Severin
Simone Ehrenberger
Markus Köhler

Erscheinungsdatum 1. Auflage
Dezember 2018

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
1. Motivation	6
2. Ausgangssituation	7
2.1. Kraftfahrzeugbestand	7
2.2. Emissionen und Klimaschutzziele	8
2.3. Biokraftstoffe	9
2.4. Alternative Antriebskonzepte	10
3. Alternative Kraftstoffe für den Verkehrssektor	11
3.1. Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe als Drop-in-Kraftstoffe	11
3.1.1. Hydriertes Pflanzenöl	12
3.1.2. Power-to-Liquid-Verfahren	16
3.1.3. Biomass-to-Liquid-Verfahren	20
3.1.4. Sunlight-to-Liquid-Verfahren	22
3.2. Near-Drop-in-Kraftstoffe	24
3.2.1. Alkohole	24
3.2.2. Erdgas	28
3.3. Weitere alternative Kraftstoffe	29
4. Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	31
Literaturverzeichnis	34

Kurzfassung

Die vorliegende Studie zeigt eine aktuelle Übersicht klimaneutraler, synthetischer Kraftstoffe aus regenerativen Energien für den Standort Deutschland. Die vielversprechendsten Kandidaten für eine großflächige Markteinführung im Zeithorizont 2020–2030 werden vorgestellt und bewertet.

Synthetische Kraftstoffe sind eine vielversprechende Alternative zu fossilen Kraftstoffen und komplementär zur Elektromobilität. Die Nutzung mit aktuellen Fahrzeugen und bestehender Infrastruktur ermöglicht einen kurzfristigen und effektiven Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Verkehr. Gleichzeitig können die Kraftstoffe so optimiert werden, dass Schadstoffe, wie Stickoxide oder Ruß, auf ein Minimum reduziert werden. Aufgrund der Vielzahl von möglichen Herstellungspfaden, Zielparametern und chemischen Zusammensetzungen werden aktuell viele synthetische Kraftstoffe als Kandidaten für den bestmöglichen Kraftstoff der Zukunft diskutiert. Als primäre Kandidaten werden identifiziert:

Biokraftstoffe der 2. Generation nutzen Pflanzenreststoffe als Rohstoff und stehen somit nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Dazu zählen hydriertes Pflanzenöl (HVO), Biomass-to-Liquid (BtL) Produkte oder Cellulose-Ethanol. HVO kann als Ersatz für Diesel dienen, Cellulose-Ethanol als Ersatz bzw. Beimischung für Benzin und der BtL-Prozess liefert sowohl Otto- und Diesekraftstoffe.

Weiterhin wurden **Power-to-Liquid (PtL)** Verfahren betrachtet, die als Rohstoffe nur CO₂, Wasser und Energie in Form von Strom aus erneuerbaren Quellen ohne die pflanzliche Photosynthese direkt nutzen. In dem mehrstufigen Prozess wird im Initialschritt per Elektrolyse Synthesegas aus Wasser und CO₂ erzeugt. Darauf folgt ein Fischer-Tropsch-Prozess oder ein Methanol-Synthesepfad zur Umwandlung in flüssige Kohlenwasserstoffe. Die Produkte von PtL sind durch die Freiheitsgrade im Syntheseprozess vielfältig und können sowohl heutige Otto- und Diesekraftstoffe klimaneutral nachbilden. Außerdem können optimierte Kraftstoffe mit verbesserten Performance- und Schadstoffeigenschaften bei gleichzeitiger Motorkompatibilität hergestellt werden (z. B. Polyoxymethyldimethylether).

In **Sunlight-to-Liquid (StL)** Verfahren werden ohne energieintensive Elektrolyseprozesse CO₂ und Wasser direkt mit Sonnenlicht in Synthesegas umgewandelt. BtL, PtL und StL unterscheiden sich jeweils in diesem Initialschritt zur Synthesegaserzeugung. Die nachfolgenden Schritte der Synthese sind identisch. Somit können die Endprodukte von BtL, PtL und StL in ihren chemischen Eigenschaften und Schadstoffbildungspotentialen identisch sein, wohingegen für die Ökobilanz, Effizienz und Kostenanalysen die gesamte Herstellungsrouten betrachtet werden muss.

Erdgas (CNG) als gasförmiger, fossiler Kraftstoff wurde hier aufgenommen, da dessen Potenzial zur kurzfristigen Treibhausgasreduzierung in aktuellen Diskussionen oftmals vernachlässigt wurde, insbesondere unter Beimischung von klimaneutralem Methan aus Biomasse oder Power-to-Gas-Prozessen.

Als Ausblick wurden weit in der Zukunft liegende (nach 2030), aber vielversprechende Kraftstoffkandidaten diskutiert. Dazu zählen **oxygenierte Kohlenwasserstoffe** wie Butanon, Methylfuran, Dimethylcarbonat oder Octanol. Diese Kraftstoffe könnten ebenfalls durch PtL, BtL oder StL hergestellt werden und langfristig wirtschaftlichere, schadstoffärmere und leistungsstärkere Alternativen darstellen.

Algen als Rohstoff für BtL-Kraftstoffe (**Biokraftstoff der 3. Generation**) sind eine interessante Alternative, die ohne Landflächenbedarf und Trinkwasserverbrauch auskommt. Eine Einführung bis 2030 ist unwahrscheinlich.

Handlungsempfehlungen

Alle betrachteten **synthetischen Kraftstoffe verbrennen deutlich sauberer als fossile Kraftstoffe**. Schadstoffbildende chemische Spezies wie Aromaten oder Schwefel, die in fossilen Kraftstoffen stets enthalten sind, werden im Syntheseprozess gezielt nicht erzeugt. Als Bewertung der verschiedenen Kraftstoffkandidaten und Handlungsempfehlungen wird in **PtL-Kraftstoffen das höchste technische**

Potenzial für klimaneutrale und schadstoffarme Kraftstoffe gesehen. Diese weisen eine hohe Kompatibilität mit heutigen Fahrzeugflotten und Infrastruktur auf, sodass mit schrittweiser Einführung ein großflächiger Einsatz bis 2030 möglich ist. Vorteile des PtL-Verfahrens sind die nahezu komplette Treibhausgasneutralität (bei der Verwendung von Strom aus regenerativen Quellen) und der minimale Rohstoff-, Flächen- und Wasserbedarf. Der mögliche Einsatz bedarf jedoch einer kurzfristig verstärkten Forschungs- und Entwicklungsförderung, sowie politischen Maßnahmen zur Förderung der Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit gegenüber heutigen fossilen Kraftstoffen und Biokraftstoffen der 1. Generation. Eine Vorreiterrolle Deutschlands würde dabei in einem nachhaltigen Verkehrssektor und der Erreichung von Klimaschutzziele resultieren und zusätzlich mit **PtL als innovativer Exporttechnologie** den Technologiestandort Deutschland stärken.

Außerdem wird die Förderung und der **rasche Einsatz von nachhaltigen Biokraftstoffen der 2. Generation** empfohlen: HVO, BtL-Kraftstoffe und Cellulose-Ethanol verwerten bislang ungenutzte Pflanzenreststoffe und können kurzfristig zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen beitragen. Die Verfahren stehen an der Schwelle zur kommerziellen Marktreife und können somit schneller und günstiger als PtL-Verfahren eingesetzt werden. Die politische Förderung muss hier primär auf die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber herkömmlichen fossilen Kraftstoffen abzielen. Der größte Nachteil dieser Biokraftstoffe ist die begrenzte Rohstoffbasis, die für eine umfassende Versorgung des deutschen Verkehrssektors nicht ausreicht.

Zusätzlich bietet die direkte Nutzung von Sonneneinstrahlung in Form von StL-Kraftstoffen eine hocheffiziente, technisch komplementäre Alternative zu Elektrolysepfaden. Die ist als Exporttechnologie, z. B. in südlichere Länder, interessant. Hier wird eine langfristige Förderung auf moderatem Level empfohlen.

1. Motivation

Die Ziele Deutschlands zum Klimaschutz sind ambitioniert und nehmen weltweit eine Vorreiterrolle ein. So haben Bundesumweltministerin Svenja Schulze und Bundesentwicklungsminister Dr. Gerd Müller gerade erst im Rahmen der 24. Weltklimakonferenz in Katowice, Polen am 3. Dezember 2018 eine Verdopplung der Zusage für den internationalen Klimafonds um weitere 1,5 Milliarden Euro angekündigt (BMU, 2018). In Deutschland selbst wurden in den letzten Jahren große Fortschritte bei der Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei der Energieversorgung und in der Industrie erreicht. Im Verkehrssektor sind die Anstrengungen zur Reduzierung von Emissionen bislang jedoch von geringem Erfolg gekrönt. Die Antriebe der heutigen Kraftfahrzeuge auf deutschen Straßen basieren bis auf wenige Ausnahmen weiterhin auf der Verbrennung von Erdölprodukten. Dabei werden große Mengen an CO₂ freigesetzt, das als Treibhausgas den Klimawandel beschleunigt. Der Skandal um Abgasmanipulationen in der Automobilindustrie sowie Feinstaub- und Stickoxidgrenzwertüberschreitungen in deutschen Großstädten feuern die Diskussion an, lassen konstruktive Lösungen jedoch weitgehend vermissen. Insbesondere die derzeit abgeleiteten Maßnahmen wie Fahrverbote, Neukaufprämien oder Verhaltensempfehlungen sind spürbar in der Gesellschaft angekommen, liefern aber keine langfristigen und umfassenden Lösungsansätze.

Ein naheliegender Ansatz ist der umfassende Einsatz von Elektrofahrzeugen unter der Verwendung von Strom aus regenerativen Quellen, wie Wind-, Solar- oder Wasserkraft. Daher genießt die Elektrifizierung des Verkehrs aktuell in Industrie, Politik und Gesellschaft die größte Aufmerksamkeit und wird durch ambitionierte Entwicklungsaktivitäten gefördert. Defizite bestehen jedoch weiterhin bei der Reichweite von Elektrofahrzeugen, der Ladedauer, Ladeinfrastruktur und den Netzkapazitäten. Insellösungen und moderne Teilkonzepte werden in naher Zukunft die Entwicklung voranbringen, sind flächendeckend jedoch als vollständige Lösung insbesondere für Fern- und Schwerlastverkehr nicht zu erwarten. Zusätzlich bedeutet der Umstieg auf Elektrofahrzeuge kostspielige Fahrzeugneuanschaffungen und die CO₂-Bilanz in der Herstellung der Fahrzeugbatterien steht fortwährend in der Kritik. Diese Probleme spiegeln sich in der bis heute niedrigen Akzeptanz und der geringen Anzahl von Elektrofahrzeugen auf deutschen Straßen wider. Ein weiteres innovatives Konzept sind Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV, engl. für *fuel cell electric vehicle*), die durch Wasserstoffantrieb quasi emissionsfrei sind und lediglich Wasserdampf ausstoßen. Herausforderungen bestehen derzeit in der regenerativen Herstellung des Wasserstoffs (H₂) und insbesondere in der Infrastruktur (ein Austausch der Flotten ist ebenso notwendig, wie eine flächendeckende Bereitstellung einer Tankinfrastruktur).

Eine vielversprechende Alternative ist es, den Strom aus erneuerbaren Energien durch die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in flüssige Form umzuwandeln und diese Kraftstoffe in aktuellen Fahrzeugen mit herkömmlichen Motoren zu tanken und zu nutzen. Bei der Verbrennung solcher Kraftstoffe wird das CO₂ frei, das zur Synthese dieser Stoffe benötigt wurde. Der CO₂-Kreislauf ist somit geschlossen und die Nutzung ebenfalls klimaneutral. Der großflächige Einsatz solcher Kraftstoffe könnte sehr viel schneller erfolgen als eine umfassende Elektrifizierung des Straßenverkehrs, da vorhandene Fahrzeuge und Infrastruktur in gewohnter Weise genutzt werden könnten. Da für die Syntheserouten solcher Kraftstoffe vielfältige Möglichkeiten und Freiheitsgrade bestehen, können die Zusammensetzung und damit die Eigenschaften dieser Kraftstoffe gegenüber den erdölbasierten Kraftstoffen optimiert werden. Neben einer Verbesserung der Treibhausgasbilanz lassen sich z. B. durch einen Kraftstoff mit geringem Aromatengehalt und hoher Cetanzahl auch Schadstoffemissionen, wie Stickoxide, Kohlenstoffmonoxid oder Ruß, bei der dieselmotorischen Verbrennung reduzieren oder der



Abbildung 1: Renaissance des Verbrennungsmotors durch klimaneutrale synthetische Kraftstoffe?

Wirkungsgrad des Ottomotors durch Kraftstoffe mit höherer Oktanzahl verbessern. Für den Nutzer und die wirtschaftliche Umsetzung ist dabei natürlich der resultierende Preis ein essentieller Faktor – Weichenstellungen und Fördermöglichkeiten sind durch politische Instrumente gegeben. Aufgrund dieser Vielzahl von Zielparametern und Optimierungsmöglichkeiten werden aktuell viele synthetische Kraftstoffkomponenten als Kandidaten für den bestmöglichen Kraftstoff der Zukunft diskutiert.

Die vorliegende Studie des DLR soll einen Überblick über die Potenziale, Hemmnisse und Auswirkungen von möglichen alternativen synthetischen Kraftstoffen zur klimaneutralen und schadstoffreduzierten Nutzung im Verkehr geben. Der Fokus liegt dabei auf den flüssigen Kraftstoffen, die ohne oder mit sehr geringem Anpassungsaufwand von bestehender Fahrzeugflotte und Infrastruktur genutzt werden können. Es wird insbesondere auf die Auswirkungen der Kraftstoffkomponenten auf Schadstoffemissionen eingegangen, da hierzu in der Literatur bislang nur punktuelle Analysen zu finden sind.

2. Ausgangssituation

2.1. Kraftfahrzeugbestand

Im Jahr 2018 dominiert der herkömmliche Verbrennungsmotor den Verkehrssektor in Deutschland. Im PKW-Bestand werden etwa zwei Drittel (65,5 %) der Fahrzeuge mit konventionellem Benzin und ein Drittel (32,8 %) mit konventionellem Diesel betrieben. Sonstige Antriebsarten, wie Erdgas-, Flüssiggas-, Elektro- oder Hybridfahrzeuge sind insgesamt mit weniger als 2 % vertreten. Trotz politischem Willen und Förderung war in den letzten Jahren keine Änderung dieses Trends erkennbar (Abbildung 2), lediglich die Anteile von Diesel und Benzin haben sich etwas zugunsten des Diesels verschoben.

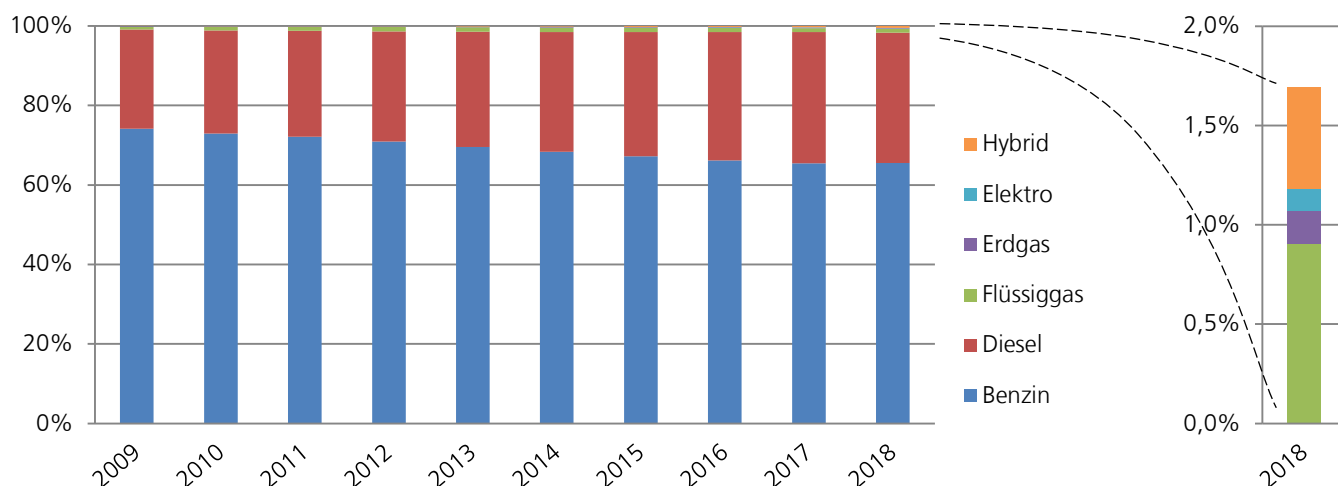


Abbildung 2: Entwicklung des PKW-Bestands in Deutschland nach Antriebsarten basierend auf Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (2018).

Die Anteile der sonstigen Antriebsarten am PKW-Bestand im Jahr 2018 sind im rechten Teil der Abbildung 2 genauer aufgeschlüsselt: Hier ist mit Flüssiggas (0,9 %) und Erdgas (0,2 %) die Verbrennung fossiler Energieträger zu einem großen Teil vertreten und der Anteil an Elektro- (0,1 %) und Hybridfahrzeugen (0,5 %) ist verschwindend gering.

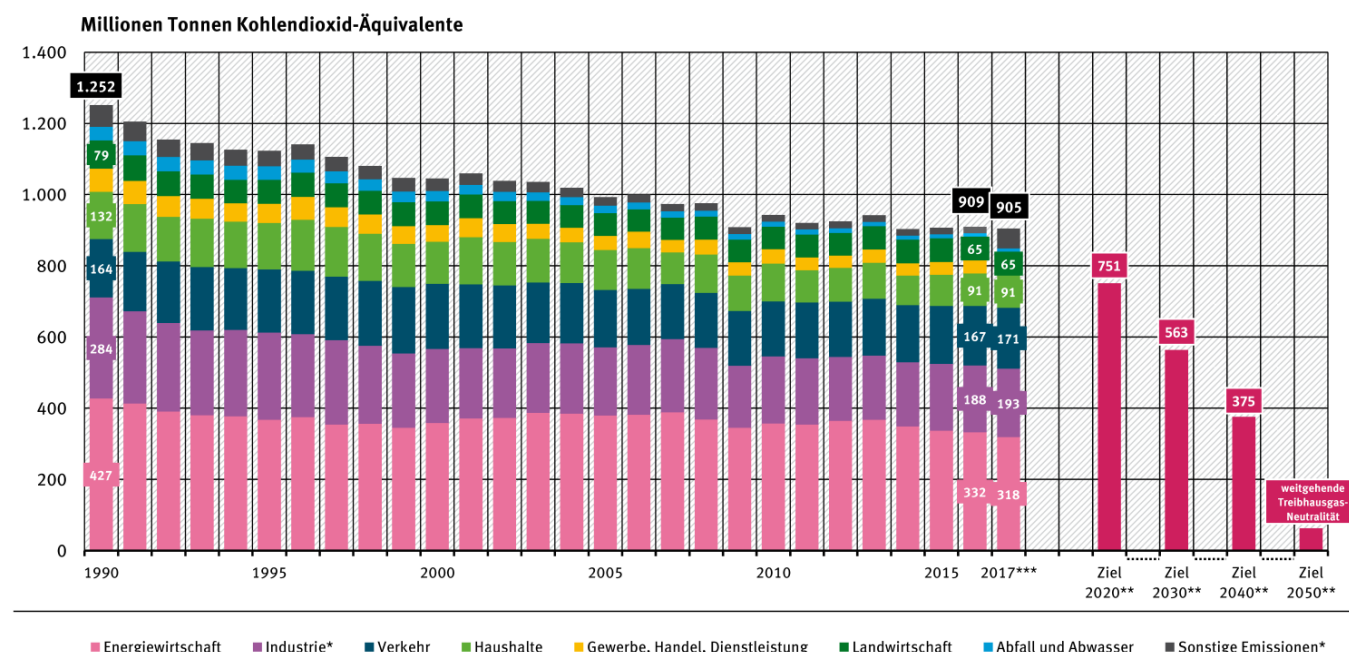
Schließt man Nutzfahrzeuge mit ein und betrachtet so den gesamten deutschen Straßenverkehr (Stand Juli 2018), so ändern sich zwar die Anteile von Benzin (62,3 %) und Diesel (36,1 %) geringfügig, die Anteile der sonstigen Antriebsarten bleiben jedoch fast konstant (Flüssiggas 0,8 %, Erdgas 0,1 %, Elektro 0,2 %, Hybrid

0,5 %). In absoluten Zahlen ist Deutschland mit 120.000 Elektro-PKW und 15.000 Elektro-Nutzfahrzeugen (Plug-in-Hybride mit eingeschlossen) noch weit vom ausgesprochenen Ziel der Bundesregierung entfernt, bis 2020 eine Million Elektroautos auf deutschen Straßen zu bringen.

Die Zahl der PKW-Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2017 zeigen eine leicht bessere Tendenz in Richtung alternative Antriebe (0,7 % Elektrofahrzeuge und 0,8 % Plug-in-Hybride). Die überwältigende Mehrheit der Neuzulassungen bilden jedoch weiterhin Benzin- (57 %) und Dieselfahrzeuge (39 %), sodass keineswegs von einer Trendwende gesprochen werden kann.

2.2. Emissionen und Klimaschutzziele

Die aktuell gültigen Klimaschutzziele der Bundesregierung wurden im November 2016 verabschiedet und sehen für Deutschland eine Reduzierung der gesamten Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % bis 2030 gegenüber 1990 und eine weitgehende Treibhausgasneutralität, d. h. eine Reduktion um 80–95 % gegenüber 1990, bis 2050 vor (BMUB, 2016). Der Verkehrssektor soll dabei mit 40–42 % zum Klimaziel 2030 beitragen. Den größten Anteil an den freigesetzten Treibhausgasen hat Kohlenstoffdioxid, das 2016 einen Anteil von 88,2 % an den gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland aufwies (Umweltbundesamt, 2018a). Da sonstige Treibhausgase (z. B. Methan) das Klima unterschiedlich stark beeinflussen, wird ihre Wirkung auf die Wirkung von Kohlenstoffdioxid normiert („Kohlendioxid-Äquivalente“). Die Entwicklung und der aktuelle Stand der Treibhausgasemissionen ist in Abbildung 3 nach Sektoren getrennt aufgetragen (Umweltbundesamt, 2018b).



Emissionen nach Kategorien der UN-Berichterstattung ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

*Industrie: Energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie; Sonstige Emissionen: Sonstige Feuerungen & Diffuse Emissionen aus Brennstoffen

**Ziele 2020 bis 2050: Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung

***Schätzung 2017, Emissionen aus Gewerbe, Handel & Dienstleistung in Sonstige Emissionen enthalten

Abbildung 3: Entwicklung der Treibhausgasemissionen Deutschlands seit 1990 und aktuelle Klimaschutzziele bis 2050 (übernommen von Umweltbundesamt (2018b)).

Bis 2017 sind die deutschen Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 um rund 28 % gesunken. Dazu beigetragen haben vor allem die Energiewirtschaft, die Industrie und die Landwirtschaft. Im Verkehr lagen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2017 dagegen sogar knapp über dem Ausgangswert von 1990. Die

Erreichung des ersten Etappenziels einer Reduzierung der gesamten Treibhausgasemissionen um 40 % bis 2020 erscheint aktuell fragwürdig und insbesondere der Beitrag des Verkehrssektors muss drastisch verbessert werden.

Mit Vorgabe eines Zeithorizonts 2020–2030 für die wirksame Einführung zukünftiger CO₂-neutraler und schadstoffarm nutzbarer Kraftstoffe reduziert sich die Vielfalt der aktuell in der Forschungslandschaft diskutierten Alternativen auf einige wenige aussichtsreiche Kraftstofftypen bzw. Herstellungsrouten. In dieser Studie werden deshalb Kraftstoffe betrachtet, deren Herstellung und Markteinführung in größeren Mengen kurz- bis mittelfristig (Zeithorizont 2030) möglich ist und die nicht mit der Nahrungs- oder Futtermittelproduktion um Rohstoffe konkurrieren, wie es z. B. bei den Biokraftstoffen der 1. Generation (Bioethanol aus Zuckerrüben oder Biodiesel aus Raps) der Fall ist. Das Treibhausgaspotenzial der betrachteten Kraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen wird bewertet. Da bei der motorischen Verbrennung auch andere Schadstoffe wie Stickoxide oder Rußpartikel entstehen, werden die Kraftstoffe zusätzlich auf ihr Schadstoffpotenzial hin untersucht. Emissionen im Verkehrssektor, die schwer zu vermeiden sind, sind vor allem der Luftfahrt, dem Fernverkehr und der Schifffahrt zuzuordnen (Davis et al., 2018).

2.3. Biokraftstoffe

Als bedeutendste alternative Kraftstoffe werden in Deutschland aktuell vor allem Biokraftstoffe in Form von Bioethanol mit einem Volumenanteil von 5 oder 10 % in Benzin (E5- bzw. E10-Kraftstoff) und Biodiesel (Fettsäuremethylester bzw. FAME, engl. für *fatty acid methyl ester*) mit einem Volumenanteil von 7 % in Diesel (B7-Kraftstoff) eingesetzt. Bioethanol wird durch die Fermentation von Getreide, Mais oder Zuckerrüben gewonnen, Biodiesel durch die Umesterung tierischer oder pflanzlicher Fette und Öle, wie z. B. Rapsöl. Diese Kraftstoffe aus Anbaubiomasse werden heute als Biokraftstoffe der 1. Generation bezeichnet (Adolf et al., 2013). Da bei der Verbrennung dieser Kraftstoffe das CO₂ frei wird, das beim Wachstum der Rohstoffpflanzen zuvor aus der Atmosphäre durch die Photosynthese gebunden wurde, galten Biokraftstoffe der 1. Generation Ende des 20. Jahrhunderts als nachhaltig und klimaschonend. Sie wurden politisch gefördert und ihre Produktion innerhalb der EU hatte sich von 2000 bis 2010 mehr als verzehnfacht (Adolf et al., 2013).

Durch die Konkurrenz dieser Kraftstoffe zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion, sowie den großen Flächenbedarf, den hohen Wasserverbrauch und die Wasserverschmutzung in der landwirtschaftlichen Produktion, gerieten die einstigen Hoffnungsträger zunehmend in die Kritik (Adolf et al., 2013). Außerdem stellen mehrere Studien, u. a. des Nobelpreisträgers Paul J. Crutzen (2008), die positive Klimabilanz in Frage. Dabei wurde vor allem der Energiebedarf für Anbau und Produktion sowie die zusätzlich freiwerdenden Treibhausgase wie N₂O durch Düngemittel gegengerechnet, die unter ungünstigen Randbedingungen sogar zu einer stärkeren Erderwärmung als bei der Nutzung fossiler Kraftstoffe führen können. Die Gesamtbilanz der Treibhausgasemissionen liegt in diesen Studien je nach Rohstoffpflanze und Szenario zwischen einem Faktor von 0,3 und 1,7 im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (Crutzen et al., 2008; Tessum et al., 2014). Rapsmethylester als Biodiesel hat dabei z. B. mit einem Faktor von 1,0 bis 1,7 eine schlechte Klimabilanz, während Bioethanol aus Zuckerrohr mit einem Faktor von 0,5 bis 0,9 Vorteile gegenüber fossilem Kraftstoff bietet. Selbst im besten Fall kann mit Biokraftstoffen der 1. Generation jedoch keine echte Klimaneutralität erreicht werden.

Als Biokraftstoffe der 2. Generation bezeichnet man Biokraftstoffe, die nicht aus eigens dafür angebauten Pflanzen gewonnen werden. Statt Stärke, Zucker oder Pflanzenöl ist der Rohstoff dabei vorwiegend Lignocellulose, die in Reststoffen wie Stroh oder Forstabfällen enthalten ist. Fast alle oben genannten Kritikpunkte gelten für Biokraftstoffe der 2. Generation nicht, sodass diese weitestgehend klimaneutral sind und die gesellschaftspolitische Akzeptanz deutlich verbessert ist. Allerdings ist die großindustrielle Umsetzung der Herstellungspfade dieser Kraftstoffe noch in der Entwicklung und war bislang ökonomisch

nicht konkurrenzfähig, sodass aktuell genutzte Biokraftstoffe noch überwiegend zur 1. Generation zählen (Adolf et al., 2013). Relevante Marktanteile von Biokraftstoffen der 2. Generation werden ab 2020 erwartet und von der EU durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED, engl. für *Renewable Energy Directive*) gefördert und gefordert (RED, RED II). Gleichzeitig sollen durch die im Juni 2018 verabschiedete aktualisierte Version der Richtlinie der Anteil an Biokraftstoffen der 1. Generation aufgrund der oben genannten Kritikpunkte ab 2021 auf 7 % begrenzt werden (RED II). In der vorliegenden Studie liegt der Fokus bei Biokraftstoffen daher hauptsächlich auf Biokraftstoffen der 2. Generation.

2.4. Alternative Antriebskonzepte

Die Weiterentwicklung der Antriebstechnik im PKW zielt insbesondere auf die Erhöhung der Energieeffizienz ab. Neben der Verbesserung der konventionellen Diesel- und Ottomotoren bietet die Elektrifizierung dieser Antriebe zu Micro- und Mildhybriden beträchtliches Potenzial zur Verbrauchsminderung. Batterieelektrische Fahrzeuge benötigen aufgrund des hohen Wirkungsgrads des elektrischen Antriebsstrangs generell weniger Energie als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Auch hier sind Effizienzverbesserungen beim E-Motor, bei der Leistungselektronik und bei der Batterieleistung zu erwarten. Hybridfahrzeuge stellen eine Kombination eines Antriebsstrangs mit Verbrennungsmotor und eines elektrischen Antriebsstrangs dar. Je nach Auslegung kann dieser elektrische Antrieb zur Unterstützung beim verbrennungsmotorischen Fahren bis hin zum vollelektrischen Fahren genutzt werden. Plug-in-Hybride weisen den größten Leistungs- und Energiekapazitätsanteil des elektrischen Antriebsstrangs auf und verfügen über eine externe Lademöglichkeit. Aktuelle Modelle verfügen über eine elektrische Reichweite von ca. 30–50 km. Für längere Strecken ermöglicht der Verbrennungsmotor eine Erhöhung der Reichweite. Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden, vereinen lokal emissionsfreies Fahren mit einer hohen Reichweite und kurzen Tankzeiten. Da sowohl batterieelektrische Fahrzeuge und Plug-in-Hybride als auch Brennstoffzellenfahrzeuge die Nutzung von regenerativen Energien für die Strom- bzw. Wasserstoffherzeugung ermöglichen, besteht hier ein großes Potenzial zur Reduktion von klimawirksamen Emissionen.

Entscheidend für die Markteinführung von effizienteren Antrieben sind neben der Wirkung in Bezug auf Reduktion der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen die Kosten der jeweiligen Maßnahme und die gesetzlichen und politischen Rahmenbedingungen. Unter der Annahme einer Weiterführung der im Jahr 2017 absehbaren technologischen und politischen Trends bis 2040 ist mit einem moderaten Anstieg von alternativen Antriebstechnologien in Deutschland zu rechnen. Berechnungen mit dem Fahrzeugtechnologie-Szenariomodell VECTOR21 zeigen, dass etwa ein Drittel der Neufahrzeugflotte aus batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-in-Hybriden bestehen würde, während etwa zwei Drittel der Neuwagen konventionelle Verbrenner mit verschiedenen Graden der Elektrifizierung darstellen (Kugler et al., 2017). Bei einer stärkeren Ausrichtung der gesetzlichen und politischen Rahmenbedingungen auf die Einführung alternativer Antriebe lassen sich jedoch höhere Anteile an elektrifizierten Antrieben in der Fahrzeugflotte erzielen. Simulationen mit VECTOR21 für das DLR-Projekt „Verkehrsentwicklung und Umwelt“ im Szenario „Geregelter Ruck“ zeigen einen Anstieg des Anteils elektrisch betriebener Fahrzeuge auf 80 % im Neuwagenmarkt (Abbildung 4). Davon sind etwa 60 % Plug-in-Hybride, 33 % batterieelektrische Fahrzeuge und 7 % Brennstoffzellenfahrzeuge (Kugler et al., 2017). Als alternativer Weg der CO₂-Minderung werden in einem weiteren Szenario PBT-L-Kraftstoffe (Power/Biomass-to-Liquid) für Ottomotoren in den Markt eingeführt. Wesentliche Annahmen sind hierbei, dass CO₂ bei der Herstellung des Kraftstoffs aufgenommen und in der CO₂-Bilanz des Fahrzeugs als Gutschrift gegenüber dem CO₂-Ausstoß im Fahrzeugbetrieb angerechnet wird und dass erneuerbare Energien für die Produktionsprozesse verwendet werden. Unter dieser Voraussetzung wählen die im Modell abgebildeten Kundengruppen verstärkt mit diesem alternativen Kraftstoff betriebene konventionelle Fahrzeuge aus. Im Vergleich zum ursprünglichen Szenario „Geregelter Ruck“ sinkt der Anteil der elektrischen Fahrzeuge um 27 % im Jahr 2040 bezogen auf den Neuwagenmarkt. In Abhängigkeit von den gesetzlichen Rahmenbedingungen und den Kostenentwicklungen für die Kraftstoffherzeugung können

die synthetischen Kraftstoffe einen Beitrag zur Verminderung der Gesamtemissionen der PKW-Flotte in Deutschland leisten und eine Ergänzung zur weiteren Elektrifizierung der Fahrzeuge darstellen. Offen ist jedoch weiterhin, welche Kraftstoffe für den PKW-Markt die größten Emissionseinsparpotenziale bieten, wie die für eine Markteinführung notwendige Reduktion der Kraftstoffkosten erreicht werden kann und welche Mengen an Kraftstoffen für den PKW-Markt zur Verfügung stehen. Gerade im Hinblick auf die Kosten der Mobilität ist in diesem Zusammenhang ein Blick auf den Verkehr insgesamt über die PKW-Nutzung hinaus notwendig.

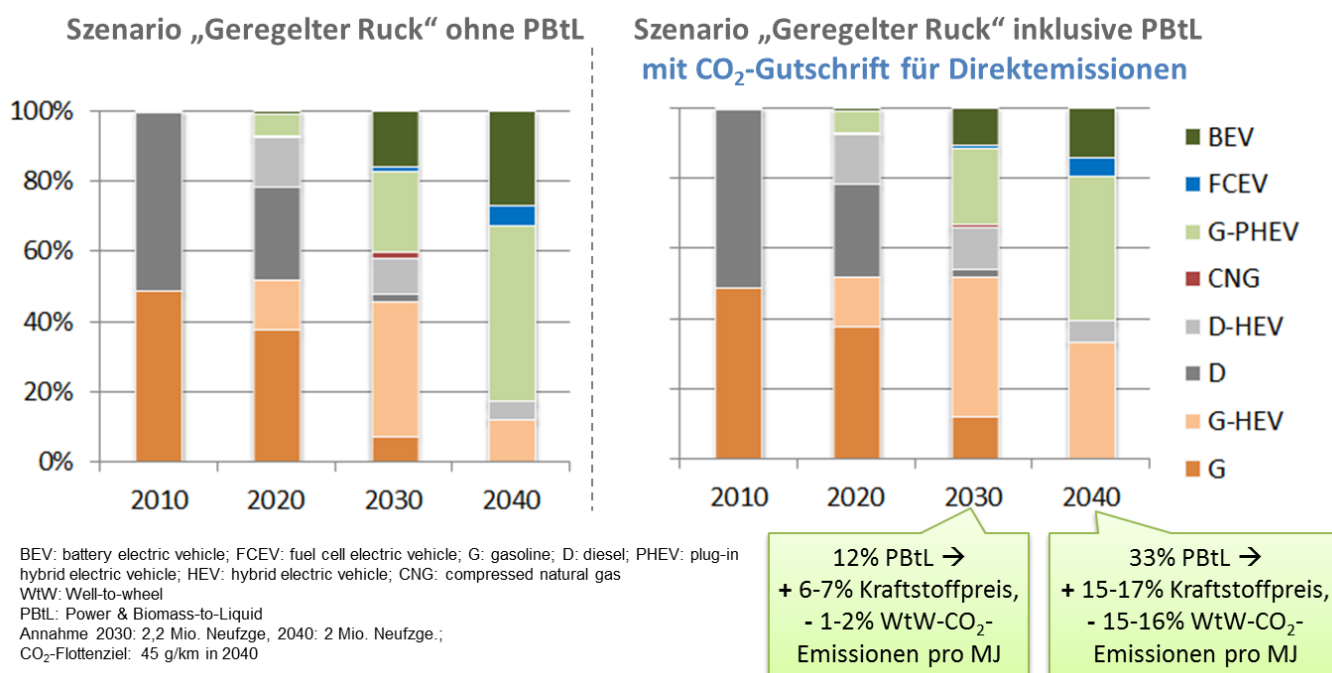


Abbildung 4: Neufahrzeugflotte in Deutschland – Szenario „Geregelter Ruck“ aus dem Projekt „Verkehrsentwicklung und Umwelt“ mit und ohne Einführung von PBtL-Kraftstoff inkl. einer Gutschrift für die CO₂-Aufnahme bei der Kraftstoffherstellung (Quelle: DLR FK-TBS (2017), Future Fuels Projekt).

3. Alternative Kraftstoffe für den Verkehrssektor

Die Unterscheidung der in Frage kommenden Kraftstoffe erfolgt nach „Drop-in“-Kraftstoffen, d. h. direkt in den Markt einführbaren Kraftstoffen, in 3.1, „Near-Drop-in“-Kraftstoffen, d. h. mit wenigen Anpassungen einsetzbaren Kraftstoffen, in 3.2 und einem Statement in 3.3 zu weiteren alternativen Kraftstoffen, die aktuell in der Forschung zwar diskutiert werden, aber eher eine längerfristige Alternative darstellen, da mit einer flächendeckenden Einführung vor 2030 nicht zu rechnen ist.

3.1. Synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe als Drop-in-Kraftstoffe

Synthetische kohlenwasserstoffbasierte Kraftstoffe sind auf Basis regenerativer, nicht-fossiler Rohstoffe (z. B. Wasserstoff, Strom aus Wind- und Solarkraft oder Biomasse) oder fossiler Rohstoffe (Erdöl, Erdgas) künstlich hergestellte chemische Produkte. Sie können von der chemischen Struktur her mehr oder weniger identisch mit fossilen Kraftstoffen sein, sodass ihre Eigenschaften den fossilen Kraftstoffen gleichen. Als Drop-in-Kraftstoff sind sie mit konventionellem Benzin oder Diesel mischbar und sofort einsatzfähig oder können diese sogar vollständig ersetzen. Durch ihre Verwendung sind keine oder geringfügige Anpassungen am vorhandenen Motorkonzept erforderlich und für Transport, Lagerung und Bereitstellung kann die bisherige

Infrastruktur der fossilen flüssigen Kraftstoffe verwendet werden. Durch die Weiternutzung des bestehenden Flottenbestands ohne teure Technologieumstellung ist mit einer hohen Nutzerakzeptanz zu rechnen. Die Produktion von synthetischen flüssigen Kraftstoffen, die drop-in-fähig sind, ist daher ein attraktives Ziel für die Automobil- und Kraftstoffindustrie. Eine Produktion synthetischer Kohlenwasserstoffe auf Basis erneuerbarer Energien bzw. nachwachsender Rohstoffe zeigt großes Potenzial Treibhausgas- und Schadstoffemissionen, wie NO_x oder Rußpartikel, drastisch zu mindern und ermöglicht das Erreichen der Klimaschutzziele durch geschlossene Kohlenstoffkreisläufe (CO₂-Neutralität). Bis die erforderlichen Produktionskapazitäten für einen massentauglichen Einsatz aufgebaut sind, ist für eine Übergangszeit eine Beimischung zu vorhandenen Kraftstoffen möglich. Dadurch werden bereits kurzfristig Potenziale zu regulatorischen Treibhausgasreduzierungsquoten erschlossen.

Aus der großen Bandbreite unterschiedlicher Technologien sind im Folgenden vier Strategien mit hohen Potenzialen identifiziert worden:

- Herstellung von hydrierten Pflanzenölen aus Abfall- und Reststoffbiomassen (bereits großtechnisch umgesetzt)
- Strombasierte Kraftstoffe über das Power-to-Liquid-Verfahren (aktuell in Entwicklungs- und Marktvorlaufphase)
- Synthetische Kraftstoffe über das Biomass-to-Liquid-Verfahren
- Solar Fuels über das Sunlight-to-Liquid-Verfahren (großes Potenzial im Zeitfenster 2030–2050)

Die verschiedenen Kraftstoffe sind nach abnehmenden Technologiereifegrad (TRL, engl. für *technology readiness level*) des Herstellungsprozesses nach Müller-Langer et al. (2017) chronologisch dargestellt.

Das Potenzial dieser Technologien wird als Brückentechnologie bis 2050 als sehr hoch eingestuft. Hohe Leistungsdichten, Lastflexibilität und sicheres Handling machen synthetische Kohlenwasserstoffe zu unverzichtbaren Energiespeichern und leistungsfähigen Mobilitätsgaranten. Für schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr sind flüssige synthetische Kraftstoffe besonders interessant, da der Einsatz batterieelektrischer Antriebe für LKW aufgrund mangelnder Reichweite limitiert ist (Kaltschmitt et al., 2017). Für PKW bieten die synthetisch hergestellten Kraftstoffe neben den Elektroantrieben eine Alternative zur Erreichung der Klimaziele im Transportsektor (Siegemund et al., 2017), sodass hier ein Wettbewerb zwischen THG-neutralen flüssigen Kraftstoffen und strombasierten Antriebsalternativen zu erwarten ist (Hobohm et al., 2018). In der Schifffahrt und insbesondere in der Luftfahrt kann der Einsatz von batterieelektrischen Antrieben aufgrund der hohen Anforderungen an mechanischer Leistung und Reichweite dieser Transportmittel die flüssigen Energieträger hoher Energiedichte in absehbarer Zeit nicht ersetzen (Kaltschmitt et al., 2017). Die synthetisch hergestellten flüssigen Kohlenwasserstoffe sind daher eine belastbare emissionsarme Lösung für diese Verkehrsträger.

3.1.1. Hydriertes Pflanzenöl

Hydriertes Pflanzenöl, kurz HVO (engl. für *hydrotreated vegetable oil*), ist ein Gemisch aus paraffinischen Kohlenwasserstoffen, die in fossilen Dieselmotoren enthalten sind. HVO ist dabei frei von Aromaten, Schwefel und Sauerstoff (Napolitano et al., 2018) und die Zusammensetzung ist vergleichbar mit synthetisch hergestellten Dieselmotoren über das Biomass-to-Liquid-Verfahren (Engman et al., 2016). Für die Herstellung von HVO kann die gleiche Rohstoffbasis (pflanzliche oder tierische Fette und Öle sowie Alt- und Abfallfette) wie bei der Herstellung von konventionellem Biodiesel (FAME, Fettsäuremethylester) verwendet werden. Bei der Herstellung von HVO erfolgt jedoch keine Veresterung der eingesetzten Pflanzenölmoleküle, sondern eine Hydrierung mit Wasserstoff nach vorheriger Entfernung von festen Bestandteilen und Wasser aus dem Rohstoff. Die Hydrierung findet unter katalytischen Bedingungen bei Temperaturen von 260–425 °C und Drücken von 35–200 bar statt (Napolitano et al., 2018) und beim Prozess werden alle

Doppelbindungen der Pflanzenmoleküle und der Sauerstoffanteil entfernt (Blei, 2014). Bei der Herstellung aus Abfall und Reststofffraktionen wird jedoch ein Biokraftstoff der 2. Generation erhalten (keine direkte Konkurrenz zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion).

Die Herstellung von HVO kann direkt in den Raffinerieprozess integriert werden oder separat erfolgen (Blei, 2014). HVO hat eine höhere Cetanzahl und lediglich eine geringere Dichte als fossiler Dieselmotorkraftstoff (Preuß et al., 2018), sodass Mischungen mit einem Anteil von bis zu 30 Vol.-% HVO noch die Dieselmotorkraftstoffnorm DIN EN 590 erfüllen (Bohl et al., 2018). Die Beimischungsgrenze ist damit deutlich höher als für konventionellen Biodiesel (7 Vol.-% nach DIN EN 590). Ein vollständiger Dieselmotorsatz ist durch HVO möglich ohne dabei technische Anpassungen vorzunehmen (Engman et al., 2016). Undichtigkeiten wurden lediglich für ältere Fahrzeuge festgestellt aufgrund der fehlenden Aromaten und des damit einhergehenden Schrumpfens von zuvor aufgequollenen Dichtungsmaterialien (Engman et al., 2016).

Das finale Gemisch weist eine ähnliche Spanne an unterschiedlichen Kettenlängen der Treibstoffkomponenten auf wie das zur Produktion eingesetzte Pflanzenöl, welches als Ausgangsmaterial dient. Anders als bei der Herstellung von Biodiesel über Veresterung, hängen die Eigenschaften von HVO jedoch kaum vom eingesetzten Rohstoff ab (Napolitano et al., 2018), da die vollständige Sättigung der Doppelbindungen bei der Hydrierung zu einer Vereinheitlichung der Eigenschaften führt (Awgustow et al., 2017). Der Verzeigungsgrad ist dennoch entscheidend für die Kälteeigenschaften, wie z. B. dem Cloudpoint, und lassen sich in der Isomerisierungseinheit des Herstellungsprozesses anpassen (Engman et al., 2016). Da die Natur meist Öle erzeugt, welche in ihrer Beschaffenheit dieselähnlicher sind, ist ein Einsatz von HVO in Dieselmotoren wirtschaftlicher. Die Herstellungskosten von HVO sind bei gleicher Rohstoffbasis aktuell noch etwas höher als für konventionellen Biodiesel aufgrund der höheren Kosten für die Hydrierung gegenüber der Transesterifizierung (Althaus et al., 2017). So liegen die Herstellungskosten auf Basis von Rapsöl pro Liter Kraftstoff für HVO etwa 15 % höher als für FAME (Naumann et al., 2016).

2017 wurden weltweit bereits 6,5 Milliarden Liter HVO produziert (2016 waren es noch 5,9 Milliarden Liter) und der größte Produzent Neste (Finnland) plant den weiteren Ausbau der Produktion in seinen drei Werken auf 3,7 Milliarden Liter (3 Millionen Tonnen) bis 2020 (REN21, 2018), wobei Neste aktuell 2,6 Millionen Tonnen HVO (Markenname Neste Renewable Diesel) produziert. Die weltweite Produktion von FAME lag 2017 zum Vergleich bei 31 Milliarden Liter (REN21, 2018). Die größten Produktionsstandorte für HVO befinden sich in Finnland, den Niederlanden, Singapur und in den USA. 2015 lag der Anteil an Abfällen und Reststoffen in der Produktion von HVO bei Neste bereits bei 68 % (Engman et al., 2016).

Das einheimische Potenzial an Altfetten ist begrenzt und wird zur Herstellung von konventionellem Biodiesel (FAME) verwendet. Zusätzliche Konkurrenz um Rohstoffe besteht zudem zur Oleochemie. Daher wird bereits an der Nutzung von Algenöl aus Mikroalgen zur Herstellung von Biodiesel/HVO, z. B. durch Neste (2016) oder Eni (2017), intensiv geforscht. Die Kultivierung von Mikroalgen ist in industriellen Großanlagen möglich (Kaltschmitt et al., 2016) und im Gegensatz zu herkömmlicher Anbaubiomasse entsteht keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder um Landnutzung. Die Algenzucht kann in Salzwasser erfolgen, wobei die Algen beim Wachstum CO₂ verbrauchen. ExxonMobil und Synthetic Genomics haben einen Algenstamm modifiziert, um die Ausbeute an Algenöl zu verdoppeln (Ajjawi et al., 2017) und eine Produktion von 10.000 Barrel Biokraftstoff aus Algen soll bis 2025 realisiert werden (ExxonMobil, 2018).

Treibhausgasbilanz und Abgasemissionen

Anhand von FAME aus Rapsöl zeigt sich, dass die Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen (WTW-THG-Emissionen) gegenüber konventionellem Diesel um 36 % geringer sind (Kaltschmitt et al., 2017). Für HVO aus Raps sind die CO₂-Emissionen sogar noch niedriger (Engman et al., 2016). Das Einsparpotenzial ergibt sich über den Verarbeitungsschritt des Pflanzenöls zum Kraftstoff, der für HVO aus Raps um 9 g CO₂-Äquivalente/MJ geringer ist als für FAME aus Raps (FNR, 2012). Arvidsson et al. (2011) haben eine Lebenszyklusanalyse (LCA, engl. für *life cycle analysis*) für HVO aus Raps, Palmöl und Jatropha vom Anbau, über die Produktion bis zur Verwendung im Motor (d. h. Well-to-Wheel) durchgeführt. Das

Treibhausgaspotenzial ist für die Produktion von HVO aus Palmöl am niedrigsten, aber für alle drei Rohstoffe deutlich geringer als für fossilen Dieselkraftstoff und vergleichbar mit FAME aus Raps. Lachgasemissionen durch den Anbau der Pflanzen machen dabei die Hälfte des Treibhausgaspotenzials aus. Eine Verwendung von Palmöl zur Herstellung von HVO sollte jedoch nach neueren Erkenntnissen vermieden werden. So sind die THG-Emissionen von Biodiesel aus Palmöl unter Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen nämlich höher als für fossilen Diesel (Fehrenbach et al., 2016).

Das Treibhausgaspotenzial ist deutlich geringer, wenn Abfall und Reststofffraktionen zur Herstellung eingesetzt werden, da der THG-Anteil des Anbaus dann entfällt (Pabst, 2015). Für FAME aus Altspeiseölen ergibt sich dann eine Reduzierung der WTW-THG-Emissionen um 84 % (Kaltschmitt et al., 2017). Für HVO liegen die THG-Einsparungen je nach Rohstoffquelle zwischen 40–90 % (Engman et al., 2016). Eine weitere CO₂-Einsparung kann erfolgen, wenn zur Hydrierung regenerativ erzeugter Wasserstoff eingesetzt wird.

HVO enthält nur paraffinische Kohlenwasserstoffe und keine Aromaten, sodass bei dieselmotorischer Verbrennung tendenziell weniger Schadstoffe als bei fossilem Dieselkraftstoff emittiert werden. (Aatola et al., 2009; Hulkkonen et al., 2011). Der extrem niedrige Schwefelgehalt wirkt sich positiv auf geringere Partikelemissionen aus (Esch und Dahlhaus, 2016). So haben Fahrzeugtests an Motorprüfständen mit Bussen, LKW und PKW gezeigt, dass durch den Einsatz von 100 % HVO bzw. 85 % HVO in Diesel gleichzeitig die Emissionen von Stickoxiden (NO_x) und Feinstaub gegenüber konventionellem Diesel (schwefelfrei nach Dieselnorm DIN EN 590) reduziert werden (Engman et al., 2016). Insbesondere die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC, engl. für *hydrocarbons*) und Partikeln (PM, engl. für *particulate matter*) sind erheblich niedriger. Die NO_x-Emissionen sind bei Bussen und LKW bis 9 % und für PKW zumindest geringfügig niedriger. Bei der Verwendung von konventionellen Biodiesel (FAME) sind die Emissionen von CO, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Partikeln aufgrund des im Kraftstoff enthaltenen Sauerstoffs und der damit einhergehenden vollständigeren Verbrennung noch geringer als für HVO (Stengel und Vium, 2015). Allerdings sind die Emissionen von NO_x höher als für fossilen Diesel (Hilgers, 2016; Stengel und Vium, 2015). Der VDA (2009) spricht von Reduzierungen der Stickstoffemissionen um bis zu 15 % durch den Einsatz von HVO.

Im Detail: Untersuchungen in einem PKW-Flottentest mit einer Kraftstoffmischung bestehend aus 7 % Biodiesel (Altspeiseölmethylester), 26 % HVO und 67 % Dieselkraftstoff, abgekürzt als R33, haben gegenüber reinem Dieselkraftstoff eine leichte Erhöhung der Stickoxidemissionen ergeben und eine Reduzierung der Emissionen von CO, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Partikeln (Götz et al., 2015). Eine Abnahme der nicht limitierten Abgaskomponenten (Polyzyklisch aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Aldehyde) wurde dabei beobachtet. Insbesondere die Aldehydkonzentrationen waren um 60 % geringer. Bei Kousoulidou et al. (2014) wurden höhere NO_x-Emissionen gemessen. In weiteren Laboruntersuchungen (Karavalakis et al., 2016; No, 2014; Prokopowicz et al., 2015; Westphal et al., 2013) konnten eine Reduzierung aller regulierten Emissionen (NO_x, CO, HC, Partikel) als auch von nicht regulierten Emissionen (Aldehyde und PAK) festgestellt werden. Suarez-Bertoa et al. (2019) haben die Abgasemissionen für 100 % HVO und Mischungen mit 30 % bzw. 7 % HVO in konventionellen Dieselkraftstoff für zwei EURO-6-Diesel-PKW unter Realfahrbedingungen gemessen und mit reinem Diesel und B7-Diesel (mit 7 Vol.-% FAME-Beimischung) verglichen. Bei niedrigeren Umgebungstemperaturen sind die Emissionen sowohl für HVO und fossilem Diesel höher. Für NO_x wurden ähnliche Konzentrationen für alle drei Kraftstoffmischungen gefunden, wobei die Emissionen von CO₂ für 100 % HVO um 4 % niedriger waren als bei den anderen zwei Mischungen. Die Konzentration an Kohlenwasserstoffen im Abgas war sogar niedriger als bei Verwendung von B7-Diesel. Die Kraftstoffeinspritzung und die Kraftstoffqualität können dabei die NO_x- und Partikelbildung beeinflussen, wie Bohl et al. (2018) für 100 % HVO in einem Testmotor gezeigt haben. Unter optimierten Bedingungen konnten die Stickoxidemissionen um bis zu 18 % und die Partikelemissionen um 42–66 % verringert werden bei zusätzlich geringerem Kraftstoffverbrauch von 4,3 % (Bohl et al., 2018).

Zusammenfassend zeigen die zahlreichen Untersuchungen für CO und Partikel generell eine Abnahme im Abgas gegenüber fossilen Diesel. Sofern untersucht, sind ebenfalls die nicht regulierten Aldehyd- und PAK-Emissionen geringer. Für die Stickoxide zeigen die meisten Untersuchungen eine verminderte Emission. Zu beachten ist dabei, dass die relative Reduzierung von Partikel- und Stickoxidemissionen gegenüber konventionellen Diesel stark von der Motortechnologie und den Betriebsbedingungen abhängen. Trotz der gezeigten Vorteile hinsichtlich der Abgasemissionen ist eine effiziente Abgasnachbehandlung für die motorische Verbrennung von HVO nach wie vor unerlässlich.

Potenzial

Die Produktion hydrierter Pflanzenöle ist von den vier Produktionswegen am fortschrittlichsten und erfolgt bereits im kommerziellen, technischen Maßstab. Der größte Produzent Neste setzt dabei einen hohen Anteil von Abfällen und Reststoffen zur Produktion ein. Hydrierte Pflanzenöle sind aromaten- und schwefelfreie, paraffinische Mischungen, die in höherem Anteil als FAME fossilem Diesel beigemischt werden können (bis 30 Vol.-% wird die Norm DIN EN 590 noch erfüllt). Eine Reduzierung des unteren Grenzwerts für die Dichte in der Norm DIN EN 590 wird derzeit diskutiert (Kramer et al., 2018), sodass zukünftig höhere Beimischungen möglich wären. HVO kann aber ohne weitere Anpassungen am Dieselmotor als Einzelkomponente (100 % HVO) verwendet werden. Hydrierte Pflanzenöle sind als paraffinischer Dieselmotorkraftstoff aus Hydrierungsverfahren daher bereits Teil der Norm DIN EN 15940, für die immer mehr Neufahrzeuge freigegeben werden (Kramer et al., 2018). Eine Kompatibilität zur bestehenden Infrastruktur ist ebenfalls gegeben (Kreyenberg et al., 2015). HVO weist gegenüber FAME eine wesentlich höhere Lagerstabilität aus, hat keine Wasseraffinität und verursacht weniger Ablagerungen im Motor (Awgustow et al., 2017).

Ergebnisse aus Fahrversuchen (Engman et al., 2016) und wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass hydrierte Pflanzenöle zu deutlich geringeren Rußemissionen und keiner Emission von Schwefeloxiden (SO_x) sowie zu einem geringeren Ausstoß an gesetzlich nicht geregelten Abgasen wie PAK und Aldehyden führen. Sie haben den höchsten spezifischen Heizwert (Energieinhalt pro Masse) aller derzeitigen Biokraftstoffe. Daraus folgt eine Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und damit einhergehend eine Reduzierung der CO_2 -Emissionen.

Als Produkte können beim Prozess hochwertige Mitteldestillate gewonnen werden, die für den Einsatz als Flugzeugtreibstoff (Alternative oder Blendingkomponente für Jet A-1) in Frage kommen (Awgustow et al., 2017; Zech et al., 2014).

Defizite

Im Vergleich zu den Produktionsmengen von Bioethanol oder FAME sind die Produktionsmengen von HVO noch gering. So wurden 2017 weltweit etwa 5-mal mehr Biodiesel (FAME) als HVO produziert (REN21, 2018). Bezogen auf die vorherigen Jahre zeigt jedoch HVO das stärkste Wachstum (Naumann et al., 2016). Zur Produktion von HVO der 2. Generation besteht die Herausforderung in der Schaffung einer ausreichenden, regenerativen Rohstoffbasis (Kaltschmitt und Neuling, 2018).

Da HVO einen niedrigeren volumetrischen Heizwert hat als konventioneller Diesel, führt dies zu einem höheren Kraftstoffverbrauch von 3 Vol.-% (Engman et al., 2016). Wie bei allen Dieselmotorkraftstoffen mit ultraniedrigem Schwefelgehalt sind darüber hinaus zusätzliche Additive notwendig, um die Anforderungen bezüglich der Schmierfähigkeit gemäß DIN EN 590 zu erfüllen.

Forschungs- und Handlungsempfehlungen

Zur Optimierung der konstruktiven Auslegung und zur effizienten Regelung der Motoren ist weitere Forschung erforderlich. Bei einer Verwendung von 100 % HVO und einer gleichzeitigen Optimierung des Motors können trotz des oftmals beobachteten Zielkonflikts von Ruß zu NO_x beide Schadstoffe minimiert werden (Aatola et al., 2009). Hierfür ist es jedoch notwendig, Maßnahmen zur Erreichung einer öffentlichen

Akzeptanz bezüglich eines höheren Kraftstoffverbrauchs zugunsten verringerter Schadstoffemissionen zu treffen.

HVO wird in Deutschland bisher nicht produziert und würde in Konkurrenz zur konventionellen Biodieselproduktion stehen. Aufgrund der Tatsache, dass HVO aus „Abfallstoffen“ hergestellt werden darf, um nicht unter der Begrenzung für Biokraftstoffe der 1. Generation nach der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie zu fallen, ist das technische Herstellungspotenzial in Deutschland zudem begrenzt. Dass bereits größere Mengen an Altfetten für die Produktion von FAME nach Deutschland importiert werden, lässt vermuten, dass das heimische Potenzial bereits ausgeschöpft ist (Kaltschmitt et al., 2016). Ein flächendeckender Einsatz von HVO der 2. Generation ist daher mittel- und langfristig unter den aktuellen Vorzeichen unwahrscheinlich, insbesondere ohne die Verwendung von Energiepflanzen aus nachhaltigem und umweltschonendem Anbau. Die Erweiterung der Rohstoffbasis auf Algenöle, hergestellt aus Mikroalgen, zur nachhaltigen Produktion von HVO könnte weitere Potenziale bieten und Forschung auf diesem Gebiet sollte gefördert werden.

Kurzfristig könnten dennoch über Importe geringe Mengen als Additiv konventionellen Dieselmotorkraftstoffen beigemischt werden. Die Technologie ist bereits vorhanden, kann in bestehenden Raffinerien als Co-Processing implementiert werden und besitzt das Potenzial für eine sofortige Reduzierung der Treibhausgasemissionen (Awgustow et al., 2017), da HVO unter Einhaltung der Norm DIN EN 590 mit einem Anteil von 26 Vol.-% zu B7-Diesel beigemischt werden kann.

3.1.2. Power-to-Liquid-Verfahren

Abhängig vom Ausgangssubstrat und den eingesetzten Energiequellen gibt es mehrere Herstellungspfade zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen (Dietrich et al., 2018). Unterschieden wird z. B. die Herstellung von Kraftstoffen über Coal-to-Liquid (CtL) aus Kohle, Gas-to-Liquid (GtL) aus Erdgas, Biomass-to-Liquid (BtL) aus Restbiomasse, Power-to-Liquid (PtL) aus elektrischem Strom, CO₂ und Wasser und Sunlight-to-Liquid (StL) aus Sonnenlicht, CO₂ und Wasser. Die letzten drei Prozesse sind bei Verwendung von regenerativem Strom nachhaltig, befinden sich allerdings noch in der Entwicklungsphase. CtL- und GtL-Verfahren beruhen dagegen auf der Umwandlung von fossilen Rohstoffen und besitzen sogar eine schlechtere Treibhausgasbilanz als erdölbasierte Kraftstoffe. Daher ist der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen aus diesen beiden Verfahren zum Zweck der Treibhausgasemissionsminderung nicht sinnvoll. Bei GtL könnte anstatt von Erdgas zwar nachhaltiges Biogas zur Herstellung von Kraftstoffen eingesetzt werden, bisher ist jedoch noch keine Bio-GtL-Anlage im Betrieb (Kaltschmitt und Neuling, 2018).

Der Begriff „Power-to-Liquid“ fasst Technologien zusammen, die auf eine Umwandlung von elektrischer Energie in stoffliche Energiespeicher, Energieträger und energieintensive Chemieprodukte zielen. Die Konzepte beinhalten eine direkte Verknüpfung zwischen energetischer und stofflicher Wertschöpfungskette und bieten Potenzial, durch Verringerung fossiler Rohstoffe die Klimaschutzziele in den Sektoren Energie, Verkehr und Chemie zu erreichen. Die technologisch anspruchsvollen Herstellungswege umfassen gasförmige Stoffe (z. B. Wasserstoff und CO) und flüssige Endprodukte (z. B. Kohlenwasserstoffe und Alkohole). Im Fall der flüssigen synthetischen Kohlenwasserstoffe sind prinzipiell CO₂-neutrale Drop-in-Kraftstoffe, mit dem Potenzial auf weitere Optimierbarkeit der Eigenschaften, herstellbar. Das PtL-Verfahren gehört zu den Power-to-X-Technologien, die eine Möglichkeit der Energiespeicherung bzw. Umwandlung in Chemikalien mit Strom aus regenerativen Energiequellen (z. B. Windkraft oder Photovoltaik) ermöglichen. Das „X“ steht für die zahlreichen Syntheseprodukte. So lassen sich flüssige Kraftstoffe (PtL), Wasserstoff und Methan (Power-to-Gas) oder chemische Grundstoffe (Power-to-Chemicals) herstellen. Die direkte Wärmenutzung (Power-to-Heat) ist ebenso möglich.

Trotz gleicher Rohstoffbasis (Strom, CO₂ und H₂O) kann sich die Kraftstoffsynthese im Power-to-Liquid-Verfahren unterscheiden. Zum Einsatz kommen im Wesentlichen die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese)

und die Methanolsynthese (Schmidt et al., 2018). Mittels FT-Synthese werden aus Synthesegas (H_2 und CO) höhere bzw. längerkettige Kohlenwasserstoffe hergestellt. Das Verfahren gibt es bereits seit den 1920er Jahren, wobei ursprünglich das Synthesegas über Kohleverflüssigung hergestellt wurde (Schmidt et al., 2018). In Südafrika (von der Firma Sasol) werden aber auch heute noch Diesel- und Ottokraftstoffe aus Kohle über das Coal-to-Liquid-Verfahren hergestellt (Hobohm et al., 2018). Shell nutzt die Fischer-Tropsch-Synthese großindustriell über Gas-to-Liquid-Verfahren in Malaysia und Katar.

Im PtL-Verfahren mit Fischer-Tropsch-Synthese wird dagegen Wasserstoff (H_2) für das Synthesegas über die energieintensive Elektrolyse von Wasser (H_2O), im besten Fall aus regenerativem Strom, hergestellt. Die CO -Herstellung erfolgt dagegen über die inverse CO -Shift-Reaktion aus CO_2 , das z. B. direkt aus der Umgebungsluft stammt oder aus dem Rauchgas eines Kraftwerks. So wird im Verbundprojekt Carbon2Chem® an einer Möglichkeit geforscht, um aus Hüttengasen chemische Produkte herzustellen und die Herstellung von Methanol im Technikumsmaßstab war bereits erfolgreich (BMBF, 2018a). Die Technik für den „ CO_2 -Einfang“ ist bereits vorhanden und größere Anlagen sind im Betrieb, allerdings sind die Kosten noch hoch (Bourzac, 2017). Die weltweit erste kommerzielle Anlage wurde von der Firma Climeworks in der Schweiz gebaut und filtert über 18 Kollektoren 900 Tonnen CO_2 pro Jahr aus der Luft (Climeworks, 2017).

Beim PtL-Verfahren mit nachgeschalteter Methanolsynthese wird der Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser hergestellt, aber anschließend direkt mit CO_2 katalytisch zu Methanol umgesetzt. Dadurch kann die inverse CO -Shift-Reaktion eingespart werden (Hobohm et al., 2018). Industriell wird Methanol bisher hauptsächlich noch aus Erdgas oder Kohle erzeugtem Synthesegas produziert (Schmidt et al., 2018). Das Unternehmen Carbon Recycling International produziert jedoch Methanol seit 2012 kommerziell über die direkte Katalyse von CO_2 und H_2 in Island (Carbon Recycling International, 2018). Der für die Elektrolyse von Wasser (zur Herstellung von H_2) benötigte Strom und das CO_2 stammen aus einem benachbarten geothermalen Kraftwerk. Methanol selbst ist kein Drop-in-Kraftstoff, kann aber im weiteren Prozessschritt im Methanol-to-Gasoline-Verfahren durch katalytische Umsetzung in Ottokraftstoffe umgewandelt werden. Methanol ist eine der wichtigsten Grundchemikalien in der chemischen Industrie und wird bisher hauptsächlich aus fossilen Ressourcen hergestellt (Bellotti et al., 2017). In einer Machbarkeitsstudie haben Belotti et al. (2008) gezeigt, dass die Wasser-Elektrolyseeinheit einer Power-to-Methanol-Anlage mehr als 75 % der Gesamtinvestitionen ausmacht und damit neben dem Methanolverkaufspreis einen großen Einfluss auf die Profitabilität hat. Weiterentwicklungen der Elektrolysetechnik könnten daher zum Erfolg von Power-to-X erheblich beitragen. Die Fischer-Tropsch-Synthese und Methanolsynthese sind dagegen bereits etablierte Prozesse (Agora Verkehrswende et al., 2018).

Das Fischer-Tropsch-Produkt wird in der Raffination zum synthetischen Kraftstoff umgewandelt. Die Produktbildung lässt sich bei der Fischer-Tropsch-Synthese über die Prozessbedingungen und die eingesetzten Katalysatoren steuern. So werden bei der Niedertemperatursynthese mittels Kobaltkatalysatoren langkettige Alkane für synthetische Dieselmotorkraftstoffe und bei der Hochtemperatursynthese mittels Eisenkatalysatoren kurzkettige Olefine für synthetisches Benzin (Ottokraftstoffe) hergestellt (Kaltschmitt et al., 2016). Die erste kommerzielle Power-to-Liquid-Anlage zur Produktion eines synthetischen Kohlenwasserstoffgemisches (Blue Crude), das vergleichbar mit Rohöl ist und in Raffinerien zu Wachsen, Benzin, Diesel, Kerosin oder Raketentreibstoffen weiterverarbeitet werden kann, soll 2020 in Norwegen den Betrieb aufnehmen und eine Produktionskapazität von 8000 Tonnen pro Jahr haben (Sunfire, 2018). Eine PtL-Demonstrationsanlage der Firma Sunfire steht bereits seit 2012 in Dresden und hat sich mittlerweile im Dauerbetrieb bewährt (Sunfire, 2017). Die deutsche Firma INERATEC setzt die PtL-Technologie in Kompaktanlagen für eine dezentrale Produktion von Kraftstoffen ein, hat bereits mehrere dieser Anlagen ausgeliefert und baut eine PtL-Pilotanlage für erneuerbares Kerosin am Karlsruher Institut für Technologie (KIT, 2018a). Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich (FZJ), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und weiteren Industriepartnern in einer großskaligen Forschungsinfrastruktur (EnergyLab 2.0) zusätzlich das

Zusammenspiel der Einzelprozesse von der Erzeugung über die Umwandlung und Speicherung bis hin zum Verbrauch betrachtet (KIT, 2018b).

Auch die meisten Power-to-Gas-Anlagen haben noch Demonstrationscharakter. Die Deutsche Energie-Agentur nennt mehr als 20 Forschungs- und Pilotanlagen mit Power-to-Gas-Verfahren in Deutschland (Schenuit et al., 2016). Die weltweit erste Power-to-Gas-Anlage im industriellen Maßstab zur Herstellung von Methan wurde 2013 im niedersächsischen Werlte in Betrieb genommen (Audi AG, 2013).

Treibhausgasbilanz und Abgasemissionen

Das für die Synthesegasherstellung benötigte CO₂ sollte aus der Atmosphäre bzw. aus Abgasströmen stammen und es sollte erneuerbarer Strom im gesamten Herstellungsprozess eingesetzt werden. In diesem Fall kann ein quasi treibhausgasneutraler Kraftstoff über PtL hergestellt werden (Hobohm et al., 2018). Bei Verwendung des derzeitigen Strommix in Deutschland mit hohem Kohlestromanteil wäre die THG-Bilanz sogar schlechter als für fossile Otto- und Dieselmotorkraftstoffe (Awgustow et al., 2017). Bei einer Nutzung von erneuerbarem Strom ist dennoch mit geringen CO₂-Emissionen beim Herstellungsprozess der Kraftstoffe zu rechnen. Eine Einsparung von mindestens 70 % der CO₂-Emissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen bei einer Well-to-Wheel-Betrachtung ist jedoch möglich (Agora Verkehrswende et al., 2018).

Das Schadstoffpotenzial hängt im Wesentlichen von den Eigenschaften (z. B. Cetanzahl) und der Zusammensetzung (z. B. Aromatengehalt) des Kraftstoffs ab sowie den Betriebsparametern der motorischen Verbrennung. Die Kraftstoffsynthese über Fischer-Tropsch im Power-to-Liquid-Verfahren führt zu vergleichbaren, synthetischen Kraftstoffen wie in Biomass-to-Liquid-, Gas-to-Liquid-, oder Coal-to-Liquid-Verfahren mit nachgeschalteter FT-Synthese. Daher werden, z. B. für synthetische FT-Diesel, vergleichbare Schadstoffpotenziale erwartet. FT-Dieselmotorkraftstoffe bestehen im Wesentlichen aus langkettigen Alkanen, haben einen deutlich geringeren Aromatengehalt und eine höhere Cetanzahl als fossiler Diesel und sind nahezu schwefelfrei (Gill et al., 2011). Gill et al. (2011) haben mehrere Studien zur motorischen Verbrennung von FT-Dieselmotorkraftstoffen (aus BtL-, CtL- und PtL-Prozessen) zusammengetragen und kommen zu dem Schluss, dass sich deutliche Verbesserungen bei den regulierten Emissionen (HC, NO_x, PM und CO) im Vergleich zu konventionellen Diesel ergeben ohne dabei die Motorperformance zu beeinträchtigen. Zudem besteht noch Potenzial bei der Motoroptimierung (z. B. bei der Kraftstoffeinspritzung) für die neuen synthetischen Kraftstoffe. Tabelle 1 zeigt bei wie vielen Studien unter Verwendung eines synthetischen FT-Dieselmotorkraftstoffs erhöhte, gleichbleibende oder reduzierte Emissionen festgestellt wurden.

Tabelle 1: Prozentuale Anzahl an Veröffentlichungen in denen unter Verwendung eines Fischer-Tropsch-Dieselmotorkraftstoffs erhöhte, gleichbleibende oder reduzierte Abgasemissionen im Vergleich zu konventionellen Diesel beobachtet wurden (überarbeitet aus Gill et al. (2011), Tabelle 13).

Art der Emission	Erhöhung	Gleichbleibend ^a	Abnahme
Stickoxide (NO _x)	–	21	79
Partikel (PM)	5	16	79
Kohlenwasserstoffe (HC)	–	–	100
Kohlenstoffmonoxid (CO)	–	6	94
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	11	22	67

^aIn diesen Studien wurde unter modifizierten Motorbedingungen von einer Erhöhung und Abnahme berichtet.

Potenzial

Alle Power-to-X-Verfahren zeigen flexible Einsatzmöglichkeiten und ein hohes Maß an Kopplung verschiedener Sektoren, die zusammen und im Wechselspiel nicht optimiert sind und damit noch großes

Potenzial bieten. Primärziel dieser Sektorkopplung ist die Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch Substitution von fossilen Energieträgern (Wietschel et al., 2018). Die Basis der einzusetzenden Technologien ist in Deutschland prinzipiell vorhanden und birgt das Potenzial Deutschland als Technologie- und Wirtschaftsstandort bei Auf- und Ausbau entsprechender Routen massiv zu stärken. Wenn in anderen Ländern (z. B. Australien, Marokko oder Spanien) die Standortbedingungen durch geringere Stromgestehungskosten aus erneuerbaren Energien besser sind (Perner und Bothe, 2018), muss dies kein Nachteil für Deutschland sein. Durch einen Export der zukünftigen Power-to-X-Technologien würden sich nämlich weitere Chancen ergeben und der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen könnte dann durch günstigere Importe gedeckt werden. Durch Skalierung der Anlagengröße und Herstellungsprozesse sind weitere Kostenreduktionen möglich (Perner und Bothe, 2018).

Die Produkte aus den Power-to-Liquid-Prozessrouten bergen ebenfalls ein unerschlossenes Potenzial für Gesellschaft und Umwelt. Aus historischen Gründen sind fossile Kraftstoffe zwar etabliert, aber selbst in ihrer heutigen hohen Qualität für den Verbrennungsmotor suboptimal. Sie sind chemisch sehr heterogen, sodass unter Leistungs-, aber unter Emissionsgesichtspunkten Defizite vorhanden sind. Durch die gezielte Kraftstoffsynthese (im Sinne von „Designer-Kraftstoffen“) ist im PtL-Verfahren das Potenzial vorhanden, nicht den fossilen Stoffen ähnliche, sondern optimierte Kraftstoffe, herzustellen. Analoge Strategien aus der Luftfahrt zeigen hier das Potenzial auf, z. B. in der Reduzierung von Emissionen. Die synthetischen flüssigen Kraftstoffe bieten durch ihre Kompatibilität mit der heutigen Motorentechnik und Infrastruktur eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung des vorhandenen Fahrzeugbestands. In der Luft- und Schifffahrt fehlen zudem Alternativen zu den flüssigen Energieträgern hoher Energiedichte (Perner und Bothe, 2018), sodass die PtL-Kraftstoffe hier erheblich zur Dekarbonisierung dieser Sektoren beitragen könnten. FT-Benzin kann in höheren Anteilen unter Einhaltung der Norm DIN EN 228 konventionellem Benzin beigemischt werden und paraffinischer FT-Diesel erfüllt noch die Dieselnorm DIN EN 590 bis zu einer Beimischungsgrenze von bis zu 35 % (Kramer et al., 2018).

Defizite

Der technologische Stand der Power-to-Liquid-Verfahren ist noch auf Demonstrationslevel (Schenuit et al., 2016) und Prozesse sind nicht aufeinander abgestimmt. Die oftmals propagierte Skalierbarkeit muss auf großtechnischem Herstellungsweg noch etabliert werden. Dies ist jedoch mit massiven Investitionsmaßnahmen und zunächst höheren Kosten gegenüber fossilen Kraftstoffen verbunden. Für die erste kommerzielle Produktion eines synthetischen Kraftstoffs über PtL wird ein Preis von unter 2 Euro anvisiert (Sunfire, 2018). Es ist absehbar, dass Prozessoptimierungen und -abstimmungen Langzeitentwicklungen benötigen und auch daran gekoppelte Designer-Kraftstoffe nicht kurzfristig verfügbar sein werden. Insbesondere die Verfügbarkeit an elektrischer Energie für die Synthese ist die zentrale Frage in Power-to-X-Konzepten und für eine erfolgreiche Umsetzung entscheidend. Power-to-Liquid-Kraftstoffe sind zwar ideale Energiespeicher, wenn der Stromsektor zunehmend aus erneuerbaren Energiequellen besteht und damit einhergehend Fluktuationen bei der Stromerzeugung zunehmen, die Power-to-X-Anlagen brauchen jedoch wegen der hohen Investitionskosten eine hohe Auslastung für einen wirtschaftlichen Betrieb. Überschussstrom ist daher nicht geeignet und eigene Erneuerbare-Energien-Anlagen müssen für Power-to-X-Anlagen gebaut werden (Agora Verkehrswende et al., 2018).

Forschungs- und Handlungsempfehlungen

Anstelle der Detailoptimierung einzelner Prozesse (z. B. Elektrolyse) wäre eine gesamte Verzahnung der Prozesskette mit Ausrichtung auf großtechnischer Skala zielführend. Die Kopernikusprojekte P2X gehen im Kern nach diesem Ansatz vor und demonstrieren die Verzahnung auf gesamter Prozesskette von der Erzeugung bis zur Nutzung (Ausfelder und Dura, 2018). Die Entwicklung von numerischen und experimentellen Methoden und Werkzeugen in den einzelnen Bereichen ermöglicht die Erfassung der Prozessschritte und zielt in spätere Optimierungsstrategien, die weitläufig anwendbar sein könnten.

Hierdurch ergibt sich die Chance, mittelfristig einem Beitrag im Kraftstoffsektor durch Beimischungen zu leisten.

Die Power-to-X-Route ist eine vielseitige und vielversprechende Strategie, die aber zumindest im Verkehr auf kurzfristiger Zeitskala durch hohe Investitionskosten (z. B. im Bereich der Elektrolyse) nicht konkurrenzfähig ist. Langfristig zeigt sie als Schlüsseltechnologie großes Potenzial für die Sektoren Chemie und Verkehr (Schwerlastverkehr, Luftfahrt und Schifffahrt), benötigt dazu jedoch intensiven Forschungsbedarf. Die Förderung entsprechender Technologien und wissenschaftlicher Werkzeuge wird als zukunftssträchtige Investition empfohlen.

Politisch ist die Schaffung einer Basis für einen fairen Technologiewettbewerb durch regulatorische Rahmen für eine Internalisierung der externen Kosten (Klimaschäden) eine essentielle Maßnahme. So sollte das gesamte Treibhausgaspotenzial von der Rohstoffbeschaffung bis zur Endnutzung (Well-to-Wheel) betrachtet werden. In der derzeitigen Gesetzgebung sind dagegen die CO₂-Emissionen durch die Kraftstoffnutzung (Tank-to-Wheel) relevant (Kramer et al., 2018). Nur bei der Well-to-Wheel-Betrachtung sind Power-to-Liquid-Kraftstoffe nahezu CO₂-neutral. Flüssige Kraftstoffe werden zukünftig im Verkehr noch benötigt, sodass nach einer aktuellen Studie der Prognos AG (Hobohm et al., 2018) die Entwicklung der Power-to-Liquid-Technologie unter Klimaschutzgesichtspunkten eine „No-Regret“-Maßnahme ist und die Markteinführung unterstützt werden sollte.

Da der Gesamtenergiebedarf zu groß ist, um eine Produktion von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland vollständig durch Wind- und Solaranlagen abzudecken, sollte zusätzlich ein Import von klimaneutralen Kraftstoffen in Erwägung gezogen werden, um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors zu erreichen.

3.1.3. Biomass-to-Liquid-Verfahren

Beim Biomass-to-Liquid-Verfahren werden biogene Rohstoffe mit geringem Wasseranteil mittels Pyrolyse, Vergasung und nachgeschalteter Fischer-Tropsch-Synthese oder Methanolsynthese wie bei PtL in hochwertige Kraftstoffe überführt. Bei der Vergasung wird die in der Pyrolyse vorbehandelte Biomasse zum Synthesegas umgewandelt, das in der anschließenden Kraftstoffsynthese verwendet wird. Für die Herstellung des Synthesegases aus Biomasse kommen Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromvergaser prinzipiell in Frage, wobei die Flugstromvergasertechnologie die weltweit dominierende Technologie ist (Eberhard et al., 2018). In den Biomass-to-Liquid-Verfahren werden nur thermochemische Prozesse angewandt und keine biochemischen, wie z. B. der Fermentation (Dimitriou et al., 2018). Im nachgeschalteten Raffinerieprozess können wie bei PtL sowohl Diesel- als auch Ottokraftstoffe oder Kerosin hergestellt werden. Als Rohstoffe kommen alle möglichen holzartigen oder ligninhaltigen Reststoffe aus Forstwirtschaft (Restholz), Landwirtschaft (Stroh) und Industrie (Holzabfälle) sowie kommunale Abfälle in Frage, sodass die hergestellten Kraftstoffe weitgehend CO₂-neutral sind. Die Kraftstoffe gehören dann zur 2. Generation. Eine Herstellung aus Anbaubiomasse (Kraftstoffe der 1. Generation) sollte nach Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU vermieden werden und hat ein deutlich höheres Treibhausgaspotenzial. Der ökologische Fußabdruck ist folglich davon abhängig, ob Kraftstoffe der 1. oder 2. Generation produziert werden. Pilotanlagen in Deutschland (z. B. Bioliq®-Anlage am Karlsruher Institut für Technologie) verwenden zur Herstellung von Biokraftstoffen der 2. Generation Nebenprodukte und Reststoffe der Agrarindustrie (z. B. Stroh) und Forstwirtschaft (Lignocellulose), d. h. Rohstoffe, die sich bisher bedingt für den Einsatz in Biogasanlagen eignen. Die Bioliq®-Anlage produziert Benzin in einer abgewandelten Form des Methanol-to-Gasoline-Verfahrens über Dimethylether (DME), das zunächst aus Synthesegas hergestellt wird (Dahmen et al., 2012). DME hat eine niedrige Selbstentzündungstemperatur und eine hohe Cetanzahl und eignet sich auch als Dieselerersatz. Da es sich bei Umgebungsbedingungen um ein Gas handelt, muss es jedoch wie Erdgas zunächst verflüssigt werden. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von DME unterscheiden sich deutlich von konventionellen Diesel, sodass DME nicht drop-in-fähig ist (Kramer et al., 2018) und die Motoren für diesen Kraftstoff modifiziert werden müssen.

Treibhausgasbilanz und Abgasemissionen

Als Biokraftstoff der 2. Generation sind die Treibhausgasemissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen drastisch reduziert, da es sich wie bei den synthetischen Kraftstoffen aus dem Power-to-Liquid-Verfahren um nahezu CO₂-neutrale Kraftstoffe handelt. Solche aus regenerativen Rohstoffen hergestellte Kraftstoffe haben daher das Potenzial für eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 70 % (Agora Verkehrswende et al., 2018). Xie et al. (Xie et al., 2011) zeigen anhand einer Lebenszyklusanalyse, dass die WTW-THG-Emissionen eines synthetischen FT-Diesels gegenüber fossilen Diesel um 77 % gesenkt werden könnten, wenn als Rohstoffquelle nur Biomasse eingesetzt wird.

Für einen synthetischen Fischer-Tropsch-Diesel aus dem Biomass-to-Liquid-Verfahren gelten die gleichen Beobachtungen bezüglich der Abgasemissionen wie bereits in Kapitel 3.1.2 diskutiert. Die Abwesenheit von Schwefel und Aromaten und die hohe Cetanzahl führen zu positiven Effekten bezüglich des Schadstoffpotenzials und eine Reduzierung der limitierten Emissionen NO_x, PM, HC, CO und CO₂ wird in den meisten Studien beobachtet (Schemme et al., 2017).

Durch eine gezielte Kraftstoffsynthese lassen sich die Eigenschaften und Schadstoffpotenziale verbessern, wie anhand der Polyoxymethyldimethylether (OME) gezeigt werden kann. OME enthalten Sauerstoff und ähneln von ihrer Struktur eher Biomasse als Benzin oder Diesel. Aufgrund des hohen Sauerstoffanteils im Molekül (höher als bei Bioethanol oder Biodiesel) ermöglichen sie eine nahezu rußfreie Verbrennung. Die Abwesenheit von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen reduziert die Rußbildung, da keine Alkene gebildet werden können (Liu et al., 2019). Gleichzeitig lassen sich unter optimierten Motorbedingungen die NO_x-Emissionen sogar unter stöchiometrischen Bedingungen reduzieren (Härtl et al., 2015). Ihre Herstellung kann in BtL- und PtL-Verfahren aus Synthesegas über Methanol und Formaldehyd erfolgen. Solche oxygenierten Kraftstoffe können einen wichtigen Bestandteil möglicher optimierter synthetischer Kraftstoffzusammensetzungen als Aufbau-Strategie im Sinne der Designer-Kraftstoffe sein und über 2030 hinaus bislang ungenutztes Potenzial freisetzen. Bisher werden sie industriell vor allem in China über CtL-Verfahren hergestellt (China Daily, 2014; Xu et al., 2017). OME kommen dabei aufgrund ihrer Eigenschaften als Dieseleratz in Frage. Der einfachste Vertreter ist das Dimethoxymethan (oft als OME1 bezeichnet) mit einer Cetanzahl von 30 (Arteconi et al., 2011) und erste Straßenfahrten mit 15 Vol.-% OME1 in fossilem Diesel wurden bereits erfolgreich von Continental (2017) mit für den Betrieb von OME1 optimierten Testfahrzeugen durchgeführt. Die Eigenschaften der OME ändern sich mit zunehmender Kettenlänge, d. h. höherem Polymerisationsgrad, und Mischungen höherer OME können bereits die meisten Eigenschaften von fossilem Diesel erfüllen, sodass solche Mischungen voraussichtlich ohne größere Anpassungen die heutige Motorentechnik und Infrastruktur nutzen könnten. Liu et al. (2019) hat eine aktuelle Übersicht über 15 Studien zur motorischen Verbrennung von höheren OME als Mischungen mit Diesel zusammengestellt. Es zeigt sich, dass ohne Optimierung der Abgasrückführung die CO- und HC-Emissionen sowie die Rußbildung reduziert werden, die NO_x-Emissionen gegenüber dem konventionellen Diesel jedoch höher sind oder gleichbleiben. Erst durch Änderung oder Anpassung der Abgasrückführung können die NO_x-Emissionen und damit alle limitierten Emissionen gesenkt werden. Durch die geringere Energiedichte ergibt sich jedoch ein höherer Kraftstoffverbrauch gegenüber fossilem Diesel. Pellegrini et al. (2018) haben außerdem gezeigt, dass die Konzentration an Formaldehyd höher sein kann.

Potenzial

Durch Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen lassen sich im BtL-Verfahren nahezu CO₂-neutrale Kraftstoffe für Diesel- und Ottomotoren herstellen. Zudem gibt es bisher ungenutztes Biomassepotenzial (vor allem Waldrestholz und Getreidestroh) in Deutschland, das bezogen auf eine energetische Nutzung etwa 448 PJ entspricht (Brosowski et al., 2015). Der Primärenergiebedarf betrug zum Vergleich im Jahr 2017 in Deutschland 13.550 PJ (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 2018), was einem Anteil der ungenutzten Biomasse in Höhe von 3,3 % entspricht. Mittels Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellte Kraftstoffe sind bereits zugelassen und in der Norm DIN EN 15940 integriert. Für kommerzielle BtL-Anlagen bietet die

Fischer-Tropsch-Synthese größtes Potenzial, aufgrund höherer Effizienzen und geringer Kosten gegenüber der TIGAS-Synthese (kombinierte Synthese von Methanol und DME) oder Methanol-to-Gasoline (Dimitriou et al., 2018). Eine BtL-Anlage lässt sich mit einer Elektrolyseanlage zu einer sogenannten PBtL-Anlage (Power + Biomass-to-Liquid) ergänzen. Dadurch wird die Effizienz erhöht und die Herstellungskosten des Kraftstoffs lassen sich trotz höherer Investitionskosten reduzieren (Hobohm et al., 2018). Die Polyoxymethyldimethylether werden kurz- bis mittelfristig aufgrund hoher Kosten und geringer Produktionskapazitäten wahrscheinlich nicht als kompletter Kraftstoffersatz verwendet werden können. Das Ziel ist es vielmehr, sie als Additive in bestehenden Infrastrukturen zu verwenden (Drop-in-Kraftstoff) und so zu einer signifikanten Reduzierung von Rußemissionen bei Verbrennungsmotoren beizutragen.

Defizite

Die Investitionskosten sind wie bei jeder Fischer-Tropsch-Anlage hoch. Eine kontinuierliche Produktion im Pilotmaßstab wurde bisher nicht erreicht und der Schritt vom Pilotmaßstab zum kommerziellen, technischen Maßstab ist noch nicht erfolgt. Im Gegensatz zur Pyrolyse und Biomassevergasung ist die Fischer-Tropsch-Synthese jedoch eine bereits etablierte Technik.

Die nationalen Biomassepotenziale sind begrenzt und eine Abdeckung aus Importen wäre zwar denkbar, ist jedoch nicht zuverlässig prognostizierbar (Hobohm et al., 2018). Lange Transportwege der Biomasse würden zudem die Produktionskosten erhöhen. Zudem besteht Konkurrenz um Rohstoffe durch Stromerzeugung oder Wärmegewinnung aus Biomasse. 2016 gab es in Deutschland bereits 8700 Biogasanlagen und 196 Biomethananlagen (Daniel-Gromke et al., 2017) und die Verwendung von Biomethan als alternativer Kraftstoff für den Schwerlasttransport oder die Schifffahrt wird ebenfalls als langfristige Option zur Dekarbonisierung diskutiert (Edel et al., 2017). Sollten sich zukünftig auch Stroh und Holz als Rohstoff in Biogasanlagen eignen (Lehmann und Friedrich, 2012), gibt es zusätzliche Konkurrenz um gemeinsame Rohstoffe.

Forschungs- und Handlungsempfehlungen

Bezüglich BtL sollte die Flugstromvergasung und die Kopplung von BtL und PtX (PBtL-Technologie) intensiver untersucht werden. Das BtL-Verfahren sollte gefördert werden, da es eine inländische Produktion von Kraftstoffen ermöglicht. Mittels einheimischer Quellen für Synthesegas, zum Teil aus bisher ungenutzter Biomasse, könnten zukünftige, binnenländische FT-Anlagen betrieben werden. Die gezielte Herstellung von Designer-Kraftstoffen mit optimierten Eigenschaften birgt dabei großes Potenzial für einen Lösungsansatz des Zielkonflikts von Partikel- zu NO_x-Bildung und sollte gefördert werden.

3.1.4. Sunlight-to-Liquid-Verfahren

Solarstrahlung als weltweit größte erneuerbare Energieressource kann direkt oder indirekt genutzt werden um synthetische Kraftstoffe zu erzeugen. Bei diesem als Sunlight-to-Liquid (StL) bezeichneten Verfahren werden die energiearmen Grundstoffe Wasser (H₂O) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) durch Solarenergie über chemische Prozesse in energiereiche Stoffe, wie Wasserstoff (H₂) und Kohlenstoffmonoxid (CO), umgewandelt. Wasserstoff kann entweder direkt als Treibstoff genutzt werden oder mit CO zu etablierten flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen weiterverarbeitet werden. Benzin und Dieselmotorkraftstoffe werden quasi in einem Schritt aus Wasser und CO₂ erzeugt. Der stromintensive Umweg über die Elektrolyse entfällt. In den StL-Verfahren kann das Licht entweder als Strahlung in photochemischen oder photoelektrochemischen Prozessen äquivalent zur Photovoltaik genutzt werden oder als Wärme äquivalent zur solarthermischen Stromerzeugung. Kraftstoffe aus StL-Verfahren werden als solare Kraftstoffe (Solar Fuels) bezeichnet. Die Herstellung eines synthetischen Kerosins in einem StL-Verfahren mit Fischer-Tropsch-Synthese konnte bereits erfolgreich demonstriert werden (Marxer et al., 2015).

Treibhausgasbilanz und Abgasemissionen

Wie bei den PtL- und BtL-Verfahren lassen sich nahezu CO₂-neutrale synthetische Kraftstoffe über Sunlight-to-Liquid herstellen. Das für die Herstellung des Synthesegases eingesetzte CO₂ muss jedoch aus einer erneuerbaren, nicht-fossilen Quelle stammen, z. B. direkt aus der Atmosphäre. Der Strombedarf in der weiteren Kraftstoffsynthese (z. B. Fischer-Tropsch-Synthese) und Aufbereitung sollte vollständig durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Die Treibhausgasemissionen lassen sich dann um über 80 % gegenüber fossilen Kraftstoffen reduzieren (Falter et al., 2016).

Für die Abgasemissionen bei Verbrennung im Motor können die gleichen Vorteile erzielt werden, wie bei den synthetisch hergestellten, flüssigen Kraftstoffen aus den Biomass-to-Liquid- und Power-to-Liquid-Verfahren.

Potenzial

Das Potenzial der solaren Kraftstofferzeugung entspricht dem der Solarenergie. Die zur Verfügung stehende Energiemenge übersteigt den Bedarf um mehrere Zehnerpotenzen. Einige Länder haben allerdings gegenüber Deutschland einen Standortvorteil, so ist das Potenzial für die Stromerzeugung aus Photovoltaik in den Staaten Nordafrikas und des Nahen Ostens (Mena-Region) etwa 260-mal größer (Hobohm et al., 2018) und damit die Stromgestehungskosten und zukünftigen Herstellungskosten für solare Kraftstoffe geringer. Durch einen Export von fortschrittlicher Solartechnik aus Deutschland würde ein erheblicher Anteil der Wertschöpfungskette auf deutscher Seite liegen. Da über StL flüssige Brennstoffe hergestellt werden, ist wie bei Erdöl ein Transport zu geringen Kosten möglich. Zentrale Anlagen können in sonnenreichen Gegenden errichtet werden und sind so nicht in direkter Konkurrenz zu anderer Landnutzung in dicht besiedelten Gebieten. Die Wirkungsgrade der Prozesse sind theoretisch mit > 50 % sehr hoch. Studien gehen davon aus, dass sich basierend auf dem derzeitigen Wissen reale Wirkungsgrade von ca. 25 % erreichen lassen. Globale Agrarfläche und geeignete Regionen mit direkter Sonneneinstrahlung (solare Kraftstoffe) konkurrieren dabei typischerweise nicht.

Technisch ist hervorzuheben, dass mit hochkonzentrierter Sonnenstrahlung in kleinen Reaktoren große Mengen der gasförmigen Energieträger bereits bei erhöhtem Druck erzeugt werden können, sodass keine oder wenig zusätzliche Energie eingesetzt werden muss, um die notwendigen Energiedichten zu erzeugen.

Defizite

Die StL-Technologie ist auf einem niedrigen TRL-Level und weist derzeit eine geringe Effizienz in der Konvertierung von Sonnenenergie zu Kraftstoff (< 5 %) auf. Nichtsdestotrotz zeigen thermodynamische Analysen ein theoretisches Limit von ca. 30 % ohne Wärmerückgewinnung und bis zu 70 % bei Wärmerückgewinnung. Die Investitionskosten werden als sehr hoch eingestuft und könnten höher als bei PtX-Anlagen sein.

Solarthermochemische Verfahren benötigen hohe Temperaturen zwischen 800 und 1500 °C. Dies hängt von den eingesetzten reaktiven Materialien ab. Das Verhältnis zwischen der Masse des Reaktivmaterials und der erzeugten Energieträger ist noch relativ gering. Da die Reaktionen im Kreis geführt werden, müssen die Reaktivmaterialien ohne Effizienzverluste langzeitstabil sein.

Die photochemischen und photoelektrochemischen Verfahren müssen bei niedrigen Temperaturen betrieben werden, daher kann die Solarstrahlung hier nicht hochkonzentriert genutzt werden. Die Kühlleistung würde den Wirkungsgrad der Verfahren zu stark reduzieren. So müssen die Produktgase über sehr große Flächen erzeugt und entsprechend gepumpt und anschließend komprimiert werden. Daher bieten sich diese Verfahren insbesondere für dezentrale Anwendungen an.

Forschungs- und Handlungsempfehlungen

Um das Potenzial der Solarenergie für die direkte Brennstoffherzeugung erschließen zu können, müssen die Arbeiten zur Entwicklung von noch effizienteren und kostengünstigeren Reaktorsystemen, wie Perovskite oder Schwefeloxide, intensiviert werden. Dies beinhaltet chemische, physikalische und materialwissenschaftliche Themen zur Synthese, Charakterisierung und Modellierung. Außerdem müssen die Reaktoren weiterentwickelt und skaliert werden. Der aktuelle Stand der Technik umfasst Systeme mit einer thermischen Leistung im Bereich 0,1–0,7 MW_{th}. Der nächste Entwicklungsschritt ist eine Demonstration im Maßstab 1–5 MW_{th}. Diese könnte um das Jahr 2020 realisiert werden. Bis 2025 könnte dann eine erste kommerzielle Anlage (> 10 MW_{th}) das Ziel sein und bis 2030 könnte die Anlagengröße der von solarthermischen Kraftwerken (> 100 MW_{th}) entsprechen.

Im Hinblick auf die StL-Verfahren besteht Forschungsbedarf bei der Integration von Solarthermianlagen (CSP, engl. für *concentrating solar power*), bei Redox- und Hochtemperaturmaterialien, dem Design und der Optimierung des Cavity-Receiver und der Wärmerückgewinnung sowie der CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre und Rauchgasen.

Analog zu CSP würde ein Programm zur Förderung der Solar Fuels die notwendige Beschleunigung bei der Entwicklung ermöglichen. Dies würde den deutschen CSP-Firmen einen neuen Markt eröffnen und noch viel wichtiger der deutschen chemischen Industrie den Einstieg in die erneuerbare Thermochemie ermöglichen.

3.2. Near-Drop-in-Kraftstoffe

Kraftstoffe, die ohne weitere Anpassung direkt die aktuelle Motorentechnologie (Diesel- oder Ottomotor) verwenden können, sind drop-in-fähig. Ist dagegen zur Verwendung eine aufwendige Motoranpassung notwendig, ist der Kraftstoff nicht drop-in-fähig. Als Near-Drop-in-Kraftstoffe werden hier Kraftstoffe bezeichnet, die als Mischung ohne Anpassung bzw. mit geringfügigen Anpassungen in Diesel- oder Ottomotoren einsatzfähig sind.

3.2.1. Alkohole

Ethanol ist sicherlich der prominenteste Vertreter der Alkohole und wird in Deutschland bis zu 10 Vol.-% herkömmlichem Benzin beigemischt (E10). Dieses Kraftstoffgemisch kann mit den meisten Benzinern verwendet werden. Für eine Verwendung mit höheren Anteilen bzw. den vollständigen Ersatz von Benzin (E100) ist dagegen eine motorische Anpassung erforderlich (Naumann et al., 2016). Anforderungen und Prüfverfahren für Ethanol als Kraftstoff sind in der Norm DIN EN 51625 geregelt. Gegenüber Benzin hat Ethanol eine höhere Oktanzahl und damit eine sehr hohe Klopfestigkeit. Nachteilig sind jedoch die bei niedrigen Temperaturen schlechteren Zündeigenschaften und der gegenüber Benzin um etwa 35 % geringere volumetrische Heizwert (Kaltschmitt et al., 2016). Der Herstellungsprozess von Ethanol aus zuckerhaltigen Pflanzen über Fermentation (Gärung) und anschließender Destillation ist etabliert und ausgereift und Bioethanol ist der weltweit am meisten produzierte Biokraftstoff. Bei Verwendung von Pflanzen, die als Nahrungs- oder Futtermittel verwendet werden können, wie z. B. Zuckerrüben oder Weizen, handelt es sich jedoch um Bioethanol der 1. Generation. Der Anteil dieser herkömmlichen Biokraftstoffe der 1. Generation am Gesamtenergiebedarf wird in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie auf 7 % begrenzt. Dies soll den Einsatz fortschrittlicher Biokraftstoffe der 2. Generation fördern, die in dieser Studie betrachtet werden.

Durch die Verwendung von bisher ungenutzter lignocellulosehaltiger Biomasse, wie Stroh oder Holzreste, muss der herkömmliche Prozess der Bioethanolherstellung zunächst angepasst werden, da die Lignocellulose eine andere Aufbereitung benötigt als zucker- oder stärkehaltige Pflanzen. Die Verarbeitung von Lignocellulose ist dabei mit einem höheren technologischen Aufwand verbunden (Meisel et al., 2015), wobei

die Verzuckerung der enthaltenen Cellulose z. B. durch enzymatische oder säurekatalysierte Hydrolyse erfolgt. Anschließend wird wie beim herkömmlichen Prozess durch Fermentation, Destillation und Dehydration der Alkohol hergestellt. Der Ligninanteil kann nicht verzuckert werden, hat jedoch einen hohen Energiegehalt und kann als Biobrennstoff zum Betreiben der Anlagen verwendet werden. Ethanol aus lignocellulosehaltiger Biomasse wird als Cellulose-Ethanol bezeichnet. In Deutschland gibt es bisher nur eine Demonstrationsanlage der Firma Clariant zur Herstellung von Cellulose-Ethanol aus Weizenstroh, die 2012 im bayrischen Straubing in Betrieb genommen wurde und eine Produktionskapazität von 1.000 Tonnen Cellulose-Ethanol pro Jahr erreicht (BDBe, 2018). Die Anlage verwendet das Sunliquid®-Verfahren, das eine Fermentierung der C₅-Zucker ermöglicht und damit eine bis zu 50 % höhere Ethanolausbeute erreicht (Clariant, 2012). Die erste kommerzielle Sunliquid®-Anlage soll in Rumänien errichtet werden mit einer Kapazität von 50.000 Tonnen Cellulose-Ethanol pro Jahr (Clariant, 2018). Die gesamte Bioethanolproduktion in Deutschland betrug rund 673.000 Tonnen im Jahr 2017 (BDBe, 2018). Mehrere kommerzielle Cellulose-Ethanol-Anlagen sind bereits in den USA im Betrieb (Retka Schill und Bailey, 2017).

Methanol, der kleinste Alkohol, kann wie in Kapitel 3.1.2 gezeigt über Power-to-Liquid-Verfahren nachhaltig hergestellt werden. Im Gegensatz zu Ethanol hat dieser jedoch eine niedrigere Energiedichte (nur halb so groß wie von Benzin) und ist deutlich toxischer als Ethanol (Hilgers, 2016). Vorteilhaft ist wie bei Ethanol die höhere Oktanzahl gegenüber Benzin, sodass eine höhere Verdichtung möglich ist. Beimischungen zu Benzin von bis zu 20 Vol.-% sind mit aktuellen Ottomotoren prinzipiell verwendbar (Sternen und Stadler, 2014). Höhere Beimischungen und Methanol als Reinkraftstoff erfordern entsprechende Motoranpassungen. Zulässig sind nach aktueller Norm DIN EN 228 bis zu 3 Vol.-% Methanol in Ottokraftstoffen. Neben der Verwendung in Ottomotoren eignet sich Methanol zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe (Methanol-to-Gasoline) sowie als Kraftstoff in Brennstoffzellen (Hilgers, 2016).

Die höheren Alkohole mit vier oder mehr Kohlenstoffatomen haben Eigenschaften, die den fossilen Otto- oder Dieselmotoren näher kommen, da mit zunehmender Kettenlänge die unpolaren Eigenschaften der Alkylkette gegenüber den polaren Eigenschaften der Hydroxyl-Gruppe dominieren. Dadurch sind höhere Beimischungen oder sogar die Verwendung als Reinkomponente ohne Motoranpassungen möglich. Bei den länger-kettigen Alkoholen gibt es mehrere Isomere, die sich zum Teil in ihren Eigenschaften unterscheiden. Butanol, ein C₄-Alkohol, hat z. B. vier verschiedene Isomere, wobei das *n*-Butanol als Kraftstoff bisher am besten untersucht ist. Butanol ist Benzin sehr ähnlich, lässt sich ohne Motoranpassungen in beliebigen Verhältnissen mit Benzin verwenden und hat einen 10 % geringen volumenbezogenen Heizwert (Kaltschmitt et al., 2016). Eine Beimischung als Additiv zu Diesel ist ebenfalls möglich. Es ist wesentlich weniger korrosiv als Ethanol, absorbiert kaum Wasser und könnte daher über die bestehende Infrastruktur verteilt werden. Butanol kann daher sogar als Drop-in-Kraftstoff aufgefasst werden.

Butanol lässt sich aus Biomasse über Fermentation herstellen. Es werden jedoch andere Bakterienstämme benötigt. Die Produktion von Biobutanol über die ABE-Fermentation (Aceton-Butanol-Ethanol-Fermentation) spielt jedoch heute wegen der günstigeren Herstellung von Butanol aus Rohöl kaum noch eine Rolle (Sahm et al., 2013). Aktuell werden jedoch alternative Herstellungsprozesse zur ABE-Fermentation für die Produktion von Biobutanol untersucht. Die Firma Gevo betreibt z. B. eine ehemalige Ethanolanlage zur Herstellung von Biobutanol in Luverne, USA (Voegelé, 2018). Auch Butamax stellt Biobutanol in einer Demonstrationsanlage in Hull, England her (Fountain, 2012). Herstellungswege um Butanol mit hohen Ausbeuten aus lignocellulosehaltiger Biomasse zu erhalten, müssen zunächst noch entwickelt werden (Sarathy, 2016). Ein weiterer zukünftiger Herstellungsweg für höhere Alkohole wird gemeinsam von Siemens und Evonik im Forschungsprojekt Reticus (BMBF, 2018b), das aus dem Kopernikus-Projekt hervorgegangen ist, verfolgt. Über Wasserelektrolyse und CO₂ aus der Atmosphäre soll zunächst regenerativ erzeugtes Synthesegas hergestellt werden, das in der anschließenden Fermentation zu höheren Alkoholen wie Butanol oder Hexanol (C₆-Alkohol) umgesetzt wird (Haas et al., 2018). Eine erste Versuchsanlage soll bis 2021 in Marl entstehen (Evonik, 2018).

Treibhausgasbilanz und Abgasemissionen

Die THG-Bilanz der Biokraftstoffe hängt von den verwendeten Rohstoffen (Emissionen durch Anbau), der Verarbeitung und dem Transport ab. Für Bioethanol der 1. Generation aus zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen liegen die Standard-THG-Emissionen daher zwischen 24 g CO₂-Äquivalente/MJ für Ethanol aus Zuckerrohr und bis zu 70 g CO₂-Äquivalente/MJ für Ethanol aus Weizen (Awgustow et al., 2017), wobei der Wert für die Standard-THG-Emissionen für den fossilen Referenzkraftstoff bei 83,8 g CO₂-Äquivalente/MJ liegt. Unter Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen, sind die THG-Emissionen von Bioethanol aus Zuckerrohr mit etwa 60 g CO₂-Äquivalente/MJ tatsächlich höher und damit schlechter als von Bioethanol aus Zuckerrüben mit etwa 38 g CO₂-Äquivalente/MJ (Fehrenbach et al., 2016). Ethanol aus Zuckerrüben hat damit ein THG-Einsparpotenzial von über 40 % gegenüber der fossilen Referenz und kann kurzfristig durchaus einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Klimabilanz beitragen. Das auf Basis von Weizen in Deutschland hergestellte Ethanol hat zwar immer noch ein Einsparpotenzial gegenüber fossilen Kraftstoffen, schneidet aber aufgrund der wesentlich höheren Emissionen bei der Verarbeitung klimatechnisch schlechter ab. Kraftstoffe aus Anbaubiomasse sollen jedoch zukünftig nicht mehr gefördert werden (Awgustow et al., 2017). Durch Verwendung lignocellulosehaltiger Biomasse kann die THG-Bilanz deutlich verbessert werden, da vor allem Lachgasemissionen bedingt durch den Anbau von Anbaubiomasse eingespart werden. Die THG-Emissionen von Bioethanol aus Weizenstroh betragen nur noch 12 g CO₂-Äquivalente/MJ (Awgustow et al., 2017), sodass sich ein Einsparpotenzial von über 85 % ergibt.

Für die höheren Alkohole ergeben sich bei vergleichbarer Rohstoffbasis aufgrund des aufwändigeren Herstellungsverfahrens höhere THG-Emissionen als für Ethanol (Awgustow et al., 2017). So ist z. B. die Destillation mit einem höheren Energieaufwand verbunden, da größere Mengen Wasser zuerst abdestilliert werden müssen. Ethanol hat dagegen einen niedrigeren Siedepunkt als Wasser.

Die C₁-C₄-Alkohole haben höhere Oktanzahlen als Benzin (Sarathy et al., 2014) und bieten sich daher vor allem als Kraftstoffadditiv für Ottomotoren an. Die kleinen Alkohole Methanol und Ethanol haben einen besonders hohen Sauerstoffanteil, sodass die Energiedichte gegenüber Benzin deutlich kleiner ist und der Kraftstoffverbrauch höher ist. Bei der Verwendung von Ethanol-Benzin-Mischungen ergeben sich jedoch geringere Abgasemissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenstoffmonoxid (CO) sowie eine verbesserte Motorleistung (Agarwal, 2007). Aus den verringerten HC- und CO-Emissionen durch vollständigerer Verbrennung resultieren geringfügig höhere CO₂-Emissionen für Ethanol-Benzin-Mischungen im Abgas (Agarwal, 2007). Thangavelu et al. (2016) haben mehrere Forschungsarbeiten zur motorischen Verbrennung von Ethanol-Benzin-Mischungen miteinander verglichen und ebenfalls deutliche Verbesserungen bei den Abgasemissionen festgestellt. Die Abgasemissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen waren bei 94 %, die CO-Emissionen bei 88,6 % und die CO₂-Emissionen bei 60 % der untersuchten Literaturquellen niedriger. Mit zunehmendem Ethanolanteil nimmt der Aromatenanteil im Ethanol-Benzin-Gemisch ab und die Partikelemissionen sinken.

Die Stickoxidemissionen hängen im Wesentlichen von den Motorbedingungen ab und weniger vom Ethanolanteil im Benzin (Hsieh et al., 2002). Durch die hohe Verdampfungsenthalpie der Alkohole sind die Verbrennungstemperaturen infolge der Ladungskühlung jedoch typischerweise niedriger. Dies wirkt sich positiv auf die NO_x-Emissionen aus. Eine Abnahme der NO_x-Emissionen wurde bei 58 % der von Thangavelu et al. (2016) untersuchten Arbeiten festgestellt.

Butanol kann ebenfalls als Kraftstoff in Mischungen mit Benzin oder als Einzelkomponente in Ottomotoren verwendet werden. In bisherigen Untersuchungen wurde oft das unverzweigte Isomer *n*-Butanol getestet. Für Ottomotoren sind die Emissionen von Stickoxiden, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Kohlenstoffmonoxid im Vergleich zu reinem Benzin für *n*-Butanol-Benzin-Mischungen niedriger oder auf gleichem Level (Sarathy, 2016; Trindade und Santos, 2017).

Butanol, aber auch Ethanol, wurden als Mischungen in Dieselmotoren in Selbstzündern getestet. Giakoumis et al. (2013) haben eine Übersicht zu Untersuchungen mit Ethanol- oder *n*-Butanol-Diesel-Mischungen in

Dieselmotoren unter transientem Motorbetrieb zusammengestellt. In den meisten Studien zeigen sich im Vergleich zum reinen Dieselmotorkraftstoff eine Reduzierung der Partikel- und CO-Emissionen und erhöhte Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen bei Verwendung von Ethanol- oder *n*-Butanol-Diesel-Mischungen. Für die NO_x-Emissionen zeigt sich jedoch kein eindeutiger Trend.

Bei den nicht limitierten Emissionen werden bei der Verbrennung von Alkoholen vor allem die Carbonylverbindungen, z. B. Formaldehyd oder Acetaldehyd, diskutiert. Diese Verbindungen zählen zu den flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs, engl. für *volatile organic compounds*). Sie können die Luftqualität beeinträchtigen, da sie toxisch und reizend sind sowie Vorläufer von Ozon sind (Sarathy et al., 2014). Aldehyde können daher einen Einfluss auf die Entstehung von Sommersmog haben (Agarwal, 2007). Bei der Verbrennung von Alkoholen sind die Aldehydemissionen deutlich höher (Agarwal, 2007). Eine Übersicht von Manzetti und Andersen (2015) zur motorischen Verbrennung von Ethanol-Benzin-Mischungen zeigt, dass Formaldehyd (CH₂O), Benzaldehyd (C₇H₆O) und Acetaldehyd (C₂H₄O) bedenkliche Verbindungen sind, die in signifikanten Konzentrationen im Abgas vorkommen können. Bei Verwendung von E10-Kraftstoff (10 Vol.-% Bioethanol) haben Pang et al. (2008) eine Erhöhung der Konzentrationen an Carbonylverbindungen im Abgas (nach der Abgasnachbehandlung mittels Drei-Wege-Katalysator) zwischen 3,0 und 61,7 % im Vergleich zu reinen Benzin (ohne Ethanolbeimischung) festgestellt. Höhere Emissionen dieser Spezies sind vor allem während des Kaltstarts signifikant. Emissionen von Formaldehyd werden jedoch durch den Drei-Wege-Katalysator effektiv reduziert (Liu et al., 2012).

Potenzial

Die Herstellung von Cellulose-Ethanol oder höheren Alkoholen aus lignocellulosehaltiger Biomasse steht nicht in Konkurrenz zum Anbau von Nahrungs- oder Futtermitteln und benötigt keine neuen Anbauflächen. Die Technik zur Herstellung von Cellulose-Ethanol ist bereits vorhanden und erste kommerzielle Anlagen im Betrieb. Die Tauglichkeit von Cellulose-Ethanol wurde bereits mit einem höheren Anteil von 20 Vol.-% in Benzin mit aktuellen Serienfahrzeugen im Realfahrbetrieb nachgewiesen (Clariant, 2017).

Die höheren Alkohole sind mit Benzin oder Diesel in höheren Anteilen (bis zu 50 Vol.-% oder sogar noch höher) mischbar und es sind oftmals geringe Motormodifikationen notwendig (Sarathy, 2016). Die Butanol-Isomere und die verzweigten Pentanol-Isomere sind wegen ihrer hohen Oktanzahl vor allem für Ottomotoren geeignet. Die unverzweigten Alkohole *n*-Pentanol und *n*-Octanol haben dagegen höhere Cetanzahlen und eignen sich besser für Dieselmotoren. Bei den höheren Alkoholen wurde bisher nur Butanol in größerem Maßstab aus Lignocellulose hergestellt (Sarathy, 2016). Biobutanol ist konventionellem Benzin deutlich ähnlicher als Ethanol und kann prinzipiell ohne Modifikation als Reinstoff in Ottomotoren eingesetzt werden. Außerdem kann mit Biobutanol die bestehende Infrastruktur für die Verteilung weiterhin genutzt werden. Die Alkohole zeigen als Mischungskomponente in konventionellem Kraftstoff im Allgemeinen positive Effekte bei den limitierten Emissionen.

Defizite

Es ist zwar technisch ohne weiteres möglich Fahrzeuge anzubieten, die sowohl mit Ethanol als auch Benzin betrieben werden können, allerdings ist Ethanol aggressiver als Benzin und greift die Dichtungen an. Daher können höhere Beimischungen nicht ohne weitere Anpassungen verwendet werden. Die toxischen Eigenschaften des Methanols sprechen gegen eine Verwendung als Kraftstoff im Verkehr, da mit Ethanol eine deutlich weniger toxische Alternative vorliegt. Außerdem hat Methanol einen geringeren Heizwert als Ethanol, sodass sich ein höherer Kraftstoffverbrauch ergeben würde und die Materialverträglichkeit ist schlechter. Butanol hat zwar bessere Eigenschaften als Ethanol, eine Umstellung der bestehenden Produktionsanlagen für die Bioethanolherstellung ist jedoch kostspielig (Ceresana, 2014).

Biokraftstoffe aus Agrarreststoffen können zwar gegenüber den fossilen Kraftstoffen eine deutliche Treibhausgasreduzierung bewirken, bezogen auf den gesamten Kraftstoffbedarf in Deutschland ist eine deutliche Erhöhung ihres Anteils über diesen Herstellungsweg hinsichtlich der begrenzt verfügbaren

Reststoffmengen jedoch limitiert. Die Herstellungskosten von Cellulose-Ethanol sind mit dem jetzigen Technologiestand hoch (Lynd et al., 2017) und Cellulose-Ethanol wird daher zunächst zu höheren Kosten als traditionelles Bioethanol aus zucker- und stärkehaltiger Anbaubiomasse erhältlich sein.

Forschungs- und Handlungsempfehlungen

Für eine Produktion von Alkoholen aus lignocellulosehaltiger Biomasse zu konkurrenzfähigen Kosten, müssen weitere Verbesserungen bei der Biomasse-Vorbehandlung, der enzymatischen Hydrolyse und der Fermentation erreicht werden (Robak und Balcerek, 2018). Erste Demonstrationsanlagen zur Herstellung von Biobutanol wurden im Ausland in Betrieb genommen. Der Herstellungsprozess muss jedoch weiter optimiert werden. Eine Forschung auf diesen Gebieten sollte daher gefördert werden, um den Übergang zur technischen und kommerziellen Skalierung zu erreichen. Um die Rohstoffbasis zu erhöhen, könnten Anreize zur Sammlung der Agrarreststoffe geschaffen werden, wie es in den USA über das Biomass Cop Assistance Program erfolgt (Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern, 2017)

3.2.2. Erdgas

Erdgas wird als Reinkraftstoff u. a. für PKW, Stadtbusse, Müllsammelfahrzeuge und leichte Nutzfahrzeuge in komprimierter Form (CNG, engl. für *compressed natural gas*) bereits seit vielen Jahren verwendet, konnte aber bisher wenige Nutzer überzeugen. Wobei die Zulassungszahlen für Erdgasfahrzeuge in Deutschland zuletzt gestiegen sind (Deutsche Energie-Agentur, 2018). Aufgrund der im Vergleich zu Benzin und Diesel geringen volumetrischen Energiedichte von Erdgas, ist eine Komprimierung bei 200 bar zur Erreichung von akzeptablen Reichweiten notwendig. Vorteilhaft ist die hohe Klopffestigkeit von Erdgas (Dudenhöffer und Pietron, 2010). Dadurch sind höhere Kompressionsraten möglich und die Effizienz steigt (Bae und Kim, 2017). Eine weitere Option für die Nutzung von Erdgas ist die Umwandlung von Erdgas über einen Syntheseprozess in flüssige Kraftstoffe über Gas-to-Liquid-Verfahren, die analog zu Benzin und Diesel sowohl als Reinkraftstoffe als auch als Drop-in-Kraftstoffe von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren genutzt werden können (siehe Kapitel 3.1.2). Der mit diesem Syntheseprozess verbundene Energiebedarf sowie die Kosten und die entstehenden CO₂-Emissionen müssten jedoch deutlich reduziert werden, um mittel- und langfristig mehr Erdgas für GtL-Prozesse im Verkehrsbereich zu nutzen.

Treibhausgasbilanz und Abgasemissionen

Die WTW-Treibhausgasbilanz unter Betrachtung der gesamten Vorkette ist von den fossilen Kraftstoffen für Erdgas am besten, sodass die Nutzung von Erdgas als Kraftstoff eine Einsparung an CO₂-Emissionen von etwa 24 % gegenüber Benzin und 21 % gegenüber Diesel bewirkt (Dudenhöffer und Pietron, 2010). Die Treibhausgasbilanz kann deutlich verbessert werden, wenn Biomethan beigemischt wird. Bei einer Beimischung von 20 % Biomethan zum Erdgas verringern sich die WTW-Treibhausgasemissionen gegenüber benzinbetriebenen Fahrzeugen bereits um 40 % und gegenüber Dieselfahrzeugen um 36 % (Dudenhöffer und Pietron, 2010). Bei reinem Biogasbetrieb ist die Treibhausgasbilanz nahezu CO₂-neutral.

Bei den Abgasemissionen bieten mit Erdgas betriebene Fahrzeuge Vorteile. So sind die CO- und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff-Emissionen um bis zu 80 % und die THG-Emissionen um bis zu 20 % niedriger als für einen Benziner der EURO-4-Norm (Dudenhöffer und Pietron, 2010). Gegenüber einem Diesel der EURO-4-Norm sind die CO- und THG-Emissionen um 10 % geringer, die Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff-Emissionen um 60 % geringer und die NO_x-Emissionen sogar um 90 % geringer (Dudenhöffer und Pietron, 2010). Erdgas hat ein niedriges C/H-Verhältnis, enthält keine Aromaten und hat einen geringen Schwefelgehalt, sodass im Vergleich zu fossilem Diesel die Partikelemissionen reduziert sind (Cho und He, 2007) und der Aufwand für die Abgasnachbehandlung zum Erreichen der Euro-6-Norm gegenüber Dieselmotoren geringer ist (Lischke et al., 2015). Obwohl bis zu 90 % der unverbrannten Kohlenwasserstoffe bei Erdgasfahrzeugen Methan sind, das ein 20-mal höheres Treibhauspotenzial als CO₂ hat (Bae und Kim, 2017), sind die Treibhausgasemissionen verglichen mit fossilen Diesel- oder

Ottokraftstoffen niedriger. Aufgrund des Methanschlupfs durch unvollständige Verbrennung kommt jedoch bei Gasfahrzeugen der Abgasnachbehandlung eine wichtige Bedeutung zu.

Potenzial

Aufgrund der ausreichenden Verfügbarkeit und Verbreitung von Erdgas besitzt dieses durchaus Potenzial, um zur Energiesicherheit und zur Verringerung von Treibhausgasemissionen im Verkehr kurzfristig beizutragen. Sowohl Biomethan als auch Methan aus Power-to-Gas-Verfahren (aus erneuerbarem Strom über den Zwischenschritt der Elektrolyse hergestelltes Methan) sind beliebig mit fossilem Erdgas mischbar und können über das vorhandene, gut ausgebaute Erdgasnetz verteilt bzw. gespeichert werden. Dadurch kann die Treibhausgasbilanz nochmals verbessert werden. Erdgas zeigt zudem gegenüber Benzin oder Diesel positive Effekte bezüglich der Abgasemissionen. Insbesondere im städtischen Verkehr könnten durch den Umstieg von Diesel- auf CNG-Antrieb bei Nutzfahrzeugen wie Bussen die direkten, lokalen Emissionen reduziert werden. So wird eine Unterschreitung der Grenzwerte von Euro-6 für Partikel- und NO_x-Emissionen um mindestens 50 % erreicht und zusätzlich sind die Geräuschemissionen von Fahrzeugen mit CNG-Antrieb niedriger (Lischke et al., 2015).

Defizite

Bei der Nutzung von CNG gibt es aus Nutzersicht noch eine Reihe von Hemmnissen, die eine stärkere Marktdurchdringung behindern, u. a. ein fehlendes Angebot (Modellvielfalt), höhere Anschaffungskosten gegenüber Benzinern und Dieselfahrzeugen sowie längere Betankungszeiten bei vergleichsweise geringeren Reichweiten. CNG spielt voraussichtlich aus heutiger Sicht solange eine Rolle als Kraftstoff, bis rein elektrische Fahrzeuge (BEV, engl. für *battery electric vehicle*) bezüglich ihrer Kosten und Reichweiten mit Diesel oder CNG in etwa gleich aufliegen, was bei ca. 500 km Reichweite je Batterieladung gegeben sein wird.

Forschungs- und Handlungsempfehlung

Damit CNG als Kraftstoff langfristig zur CO₂-Emissionsminderung beitragen kann, sind a die Effizienz der Verbrennungsmotoren für Erdgas als auch der Anteil an erneuerbarem Methan im Kraftstoff kontinuierlich zu erhöhen. Hierzu bedarf es einer Integrationsförderung von erneuerbarem Methan bzw. Biomethan durch Beimischquoten und/oder der Fortschreibung von CO₂-Grenzwerten bei Neufahrzeugen, wobei Beimischquoten direkter wirken würden. In diesem Kontext besteht Forschungsbedarf für die großtechnische Herstellung von erneuerbarem Methan aus Power-to-Gas-Verfahren und der Komprimierung (200 bar) in skalierbaren Anlagen (z.B. vor-Ort-Windpark mit angeschlossener CNG-Tankstelle bis hin zu Anlagekonfigurationen, die entsprechend eines regional vorhandenen Überschusses an erneuerbarem Strom anpassbare, d. h. flexible, Erzeugungskapazitäten aufweisen) zu einem Preis pro kg, der langfristig mit Erdgas gleichzieht oder in Form von Beimischungen zumindest als Mix im Vergleich der Energiekosten pro 100 km für die Nutzer (inkl. steuerlicher Anreize) mit erdölbasierten Kraftstoffen gleichzieht. Eine Aufgabe besteht dabei unter anderem in der Reduktion von Kosten für die Nutzung von CO₂ aus der Atmosphäre zur Herstellung von Methan aus Elektrolyse-Wasserstoff.

3.3. Weitere alternative Kraftstoffe

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick zu aktuell in der Forschung diskutierten flüssigen Biokraftstoffen gegeben werden. Die hier vorgestellten Kraftstoffe sind aber eher als langfristige Option zu verstehen, da ihre Herstellung typischerweise über den Labormaßstab noch nicht hinausgeht, d. h. kurz- bis mittelfristig ihr Potenzial zur Reduzierung von CO₂-Emissionen nicht ausschöpfen können. Es handelt sich dabei vor allem um oxygenierte Verbindungen, deren Herstellung aus Biomasse und hier im Besonderen aus lignocellulosehaltiger Biomasse erfolgen könnte.

Lignocellulose hat den großen Vorteil, dass es nicht relevant für die Nahrungskette ist und neben Reststoffen könnten spezielle Energiepflanzen, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen, verwendet werden (Leitner et al., 2017). Die typischen Biokraftstoffe, wie z. B. Ethanol und Biodiesel, werden bereits aus Biomasse gewonnen und die Herstellung von Grundchemikalien (Ethen, Propen, Butan, Butadien und BTEX-Aromaten) aus Biomasse wurde bereits umfassend untersucht und wird durch steigende Preise der fossilen Brennstoffe zunehmend attraktiver (siehe Cherubini und Strømman (2011) für einen Überblick). Neben der Herstellung von Biokraftstoffkomponenten aus Biomasse kann auch eine Herstellung kleinerer Moleküle aus Synthesegas aus produktionskostentechnischer Sichtweise attraktiv sein. So wird z. B. die Verwendung von Dimethylcarbonat diskutiert, da die Verwendung als Reinkomponente in Ottomotoren sowie als Additiv bei dieselmotorischer Verbrennung zu deutlich verringerten Emissionen führen könnte (Abdalla und Liu, 2018). Der optimale Kraftstoff ist im besten Fall frei von Aromaten und enthält Sauerstoff, um die Rußemissionen zu verringern (Leitner et al., 2017). Der Sauerstoffanteil sollte dabei jedoch nicht zu hoch sein, da sonst die Energiedichte zu niedrig wäre.

Ausgehend von der allgemeinen Molekülstruktur einer oxygenierten Verbindung der Formel $C_xH_yO_z$ wurden im Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ der RWTH Aachen insgesamt 279 Moleküle identifiziert, die einige vorgegebene Anforderungen erfüllen und damit größeres Potenzial haben (Hoppe et al., 2016b). So wurden z. B. nur oxygenierte C_1 - C_8 -Moleküle betrachtet, deren Heizwert größer als 30 MJ/kg ist, um größere Tanks zu vermeiden, und deren Siedepunkt zwischen 50 und 100 °C liegt. Die verbleibenden Kandidaten können in unterschiedliche chemische Klassen, wie z. B. Alkohole, Ketone oder Furane, eingeteilt werden.

Für den Einsatz in Ottomotoren wurden 2-Butanon (C_4H_8O) und 2-Methylfuran (C_5H_6O), die beide höhere Oktanzahlen als Benzin haben, als aussichtsreiche Kandidaten identifiziert (Hoppe et al., 2016a). Die Verdampfungsenthalpie von 2-Butanon ist um zwei Drittel und die von 2-Methylfuran um etwa 50 % geringer als von Ethanol. Dies führt zu deutlich besseren Kaltstarteigenschaften. Wie bei Ethanol kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Partikelemissionen bei der motorischen Verbrennung im Vergleich zu konventionellem Benzin. Gegenüber Ethanol werden jedoch höhere NO_x -Emissionen erzielt. Eine Vielzahl an weiteren Furanen und Tetrahydrofuranen kommen vor allem für den Einsatz in Ottomotoren in Frage (Leitner et al., 2017). Bei den Furanen zeigt sich, dass die Seitenkette nur geringen Einfluss auf die Zündwilligkeit hat, während bei den Tetrahydrofuranen die Seitenkette einen stärkeren Einfluss hat. Daher eignen sich Tetrahydrofurane mit langer Seitenkette eher für die dieselmotorische Verbrennung und Tetrahydrofurane mit kurzer Seitenkette für Ottomotoren.

Di-*n*-butylether (DNBE, $C_8H_{18}O$) und *n*-Octanol ($C_8H_{18}O$), zwei oxygenierte C_8 -Verbindungen, eignen sich für die dieselmotorische Verbrennung und erreichen sehr niedrige Rußemissionen ohne dabei negative Effekte bei den Emissionen von Stickoxiden in Kauf nehmen zu müssen (Kerschgens et al., 2016). Für einen reinen Betrieb von *n*-Octanol sind geringe Anpassungen am Dieselmotor notwendig (Sarathy, 2016).

Dies sind eine Auswahl an aktuell diskutierten, zukünftigen Kraftstoffe aus lignocellulosehaltiger Biomasse. Eine umfassende Darstellung über Biokraftstoffe aus lignocellulosehaltiger Biomasse findet sich z. B. bei Boot (2016). Als weiterer Rohstoff für Biokraftstoffe werden auch Algen diskutiert, die in großen Mengen in Anlagen im Meer gezüchtet werden können. Algenkraftstoffe werden teilweise als Biokraftstoffe der 3. Generation bezeichnet, da sie komplett ohne Landflächenbedarf und Süßwasserverbrauch hergestellt werden können. Die Herstellungsprozesse für Algenkraftstoffe befinden sich noch in einem frühen Anfangsstadium der Entwicklung und werden aktuell als ineffizient und nicht wirtschaftlich bewertet. Da eine großflächige Markteinführung mit einem Zeithorizont 2020–2030 also nicht realistisch scheint, wird in der vorliegenden Studie nicht näher auf Algenkraftstoffe eingegangen.

Datenbank – klimaneutrale synthetische Kraftstoffe im Verkehr

Im Rahmen dieser Studie wurde anhand aktueller Literatur ebenfalls eine umfangreiche Zusammenstellung zu alternativen Kraftstoffen, mit dem Schwerpunkt auf oxygenierte Verbindungen, erstellt. Mehr als 40

aktuell in der Forschung diskutierter oxygenierter Verbindungen sind in dieser Datensammlung enthalten. Die klassischen Biokraftstoffe und die fossilen Kraftstoffe (Benzin und Diesel) wurden mit aufgenommen. Diese Datensammlung enthält thermophysikalische Eigenschaften (z. B. Siedepunkt, Heizwert, Oktan- bzw. Cetanzahl), Herstellungspfade und Schadstoffpotenziale (unverbrannte Kohlenwasserstoffe, CO, NO_x, Partikel) und liefert wichtige Erkenntnisse zur Vorauswahl geeigneter Kraftstoffkandidaten. Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt dieser Datensammlung. Bisher durchgeführte Experimente unterschiedlicher Beimischungen in Otto- oder Dieselmotoren zeigen zudem technische Machbarkeiten auf. Die Datensammlung ist ein lebendes Dokument mit der Beteiligung mehrerer DLR Institute (Institut für Fahrzeugkonzepte, Technische Thermodynamik, Verbrennungstechnik) und ist beim DLR-VT ergänzend zur vorliegenden Studie verfügbar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	Kraftstoffe - Verke	CAS	Nachhaltig	Zustand	Verwendung	Rohstoffe	Herstellung	Hersteller	verwendete Mischungen	Summenformel	Molmasse	Dichte	viskosität	viskosität	viskosität	viskosität	viskosität	viskosität	viskosität
1	Fossile Kraftstoffe																		
2	PONOR E5 (DIN EN 228)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable		0.737 @ 25 °C	(Höppe et al., 2015)						
3	PONOR E10 (DIN EN 228-1)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable		0.741 @ 25 °C	(Höppe et al., 2015)						
4	Diesel (DIN EN 590)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable		0.85	(Höppe et al., 2015)						
5	Synthesynthetische Kraftstoffgemische																		
6	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
7	Benzin (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
8	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
9	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
10	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
11	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
12	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
13	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
14	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
15	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
16	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
17	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
18	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
19	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
20	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
21	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
22	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
23	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
24	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
25	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
26	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
27	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
28	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
29	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
30	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
31	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
32	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
33	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
34	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
35	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
36	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
37	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
38	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
39	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
40	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
41	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
42	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
43	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
44	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
45	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
46	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
47	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
48	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
49	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
50	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
51	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
52	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
53	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
54	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
55	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
56	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
57	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
58	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
59	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
60	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
61	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
62	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
63	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
64	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
65	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
66	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
67	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
68	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
69	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
70	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
71	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
72	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
73	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
74	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
75	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
76	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
77	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
78	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
79	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
80	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
81	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
82	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
83	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
84	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
85	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
86	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
87	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
88	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
89	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
90	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
91	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
92	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
93	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
94	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
95	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
96	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
97	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
98	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
99	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
100	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
101	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
102	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable									
103	Diesel (DL)		neue	Russig	Öl	Endl	Raffination			Variable			</						

synthetischen Kraftstoffe sind vielfältig und unterscheiden sich hinsichtlich Rohstoffen, Herstellungspfaden, Ökobilanz, Motorkompatibilität und Technologiereife. In der vorliegenden Studie wurden die vielversprechendsten Kandidaten für eine großflächige Markteinführung im Zeithorizont 2020–2030 betrachtet und bewertet:

Hydriertes Pflanzenöl (HVO) ist je nach verwendetem Rohstoff als Biokraftstoff 1. oder 2. Generation kurzfristig einsetzbar. Die Entwicklung großindustrieller Herstellung ist weit fortgeschritten. Sie weisen in der Ökobilanz geringe THG-Emissionen auf (Faktor 0,1–0,6 im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen). Weitere Abgasemissionen wie NO_x , CO und Ruß sind ebenfalls deutlich verringert. Die Cetanzahl und damit die Kraftstoffperformance ist höher als bei konventionellen Diesel. Der größte Nachteil ist, wie bei allen Biokraftstoffen der 2. Generation, die geringe Rohstoffbasis von pflanzlichen Reststoffen, die für eine umfassende flächendeckende Kraftstoffversorgung nicht ausreicht. Als kurzfristig verfügbare Beimischung in moderaten Mengen ist HVO zur THG-Reduzierung gut geeignet. Forschung und Entwicklung sind im passenden Verhältnis, politische Maßnahmen zur Preisgestaltung und Konkurrenzfähigkeit gegenüber fossilen Kraftstoffen können jedoch von Nöten sein.

Power-to-Liquid (PtL) Kraftstoffe bieten hohes Potenzial von nahezu kompletter THG-Neutralität, wenn zur Erzeugung Strom aus regenerativen Quellen verwendet wird und atmosphärisches CO_2 als Kohlenstoffbasis dient. PtL-Kraftstoffe liefern typischerweise geringere Schadstoffemissionen in Bezug auf NO_x , CO und Ruß und haben als Dieselerersatz eine höhere Cetanzahl. PtL-Produkte bieten besonderes Optimierungspotenzial in Bezug auf Schadstoffe und Performance, da im Prozess große Freiheitsgrade bestehen und völlig neuartige klimaneutrale Designer-Kraftstoffe hergestellt werden können, die trotzdem heutige Kraftstoffnormen erfüllen. Der PtL-Prozess ist ebenfalls für Luftfahrt, Schifffahrt oder die Energiewirtschaft nutzbar, sodass durch die Verschränkung der Ressorts hohe Synergieeffekte zu erwarten sind und ein hohes Potenzial als Exporttechnologie besteht. Bisher existieren hauptsächlich Demonstrationsanlagen zur Herstellung und für die Verfügbarkeit einer industriellen, effizienten und kommerziellen Herstellung besteht noch Entwicklungs- und Investitionsbedarf. Der aktuelle technologische Stand, hohe Investitionskosten für PtL-Anlagen im großen Maßstab, und mangelnde Wirtschaftlichkeit gegenüber aktuellen fossilen Kraftstoffen stellen die größten Nachteile dar. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sollten intensiv gefördert und durch geeignete politische Maßnahmen finanzielle Anreize zur Wettbewerbsfähigkeit geschaffen werden, z. B. durch Betrachtung einer fairen Ökobilanzierung bei Festsetzung von Abgaben oder Netzentgeltbefreiungen bei Einsatz von Strom aus regenerativen Quellen.

Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffe sind Biokraftstoffe der 2. Generation, die nahezu CO_2 -neutral eingesetzt werden können. Die Rohstoffbasis ist breiter als für übrige Biokraftstoffe (z. B. HVO und Bioethanol) und die Endprodukte sind ähnlich den PtL-Produkten, da die Herstellungspfade bis auf den ersten Schritt (kein CO_2 -Einfang) dieselben sind. Die Schadstoffpotenziale, Performance und Fuel-Design-Möglichkeiten sind daher identisch zu PtL, bei geringerem Energiebedarf. Die Technologie ist weniger fortgeschritten als bei anderen Biokraftstoffen und die Wirtschaftlichkeit ist noch nicht gegeben. Mittelfristig könnten BtL-Verfahren die Biokraftstoffherstellung mit der größten Flexibilität in Bezug auf Ein- und Ausgangsstoffe darstellen. Zudem bieten Verschränkungen mit PtL-Routen eine attraktive Ergänzung als Kohlenstoffquelle, die technisch jedoch noch auf niedrigem TRL-Level stehen. Die Förderung weiterer Forschungsaktivitäten wird daher empfohlen.

Sunlight-to-Liquid (StL) Kraftstoffe unterscheiden sich wie BtL im ersten Prozessschritt von PtL und können identische Endprodukte liefern. Statt regenerativem Strom wird Sonnenlicht direkt über photochemische oder solarthermische Verfahren zusammen mit atmosphärischem CO_2 und Wasser zur Kraftstoffherstellung im primären Schritt genutzt. Durch die Einsparung der verlustbehafteten Stromerzeugung und der energieintensiven Elektrolyse können sehr hohe Wirkungsgrade erzielt werden, sodass Reduzierungen der THG-Emissionen über 80 % realistisch sind. Dieses Potenzial besteht allerdings hauptsächlich in Ländern mit intensiverer Sonneneinstrahlung. Denkbar für Deutschland ist ein Technologieexport gekoppelt mit einem Kraftstoffimport. Nachteile sind der niedrige technologische Stand und hohe Investitionskosten.

Forschungsbedarf besteht vor allem zu Materialien der Solarreceiver und zur Skalierung der Anlagen – die Förderung solcher Forschungsaktivitäten zur Stärkung des Technologie- und Innovationsstandorts Deutschland wird empfohlen.

Bioethanol der 2. Generation bietet als fortschrittlicher Biokraftstoff geringste THG-Emissionen und Einsatzmöglichkeiten innerhalb weniger Jahre, erfordert jedoch Anpassungen am Kraftfahrzeug für höhere Beimischraten als bisheriges E10. Höhere Bio-Alkohole wie Butanol weisen eine bessere Motorkompatibilität auf, haben aber einen höheren Energieaufwand in der Herstellung und damit höhere THG-Emissionen. Die Entwicklung der industriellen Herstellung ist für Bioethanol aus Cellulose so weit fortgeschritten, dass kommerzielle Anlagen aktuell im Aufbau sind. Durch den Sauerstoffanteil verbrennen Alkohole generell mit sehr geringen Schadstoffemissionen in Bezug auf NO_x, Ruß und CO. Nachteil ist wie bei den übrigen Biokraftstoffen der 2. Generation die begrenzte Rohstoffbasis für eine umfassende Versorgung mit Biokraftstoff. Im Gegensatz zu Bioethanol der 1. Generation stehen diese Kraftstoffe nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Politische Rahmenbedingungen zur Förderung von Biokraftstoffen der 2. Generation wurden bereits durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) der EU geschaffen.

Erdgas (CNG) als gasförmiger fossiler Kraftstoff mit geringem Kohlenstoffanteil und der Möglichkeit der Mischung mit Biomethan oder Methan aus PtG-Prozessen bietet große Potenziale zur kurzfristigen THG-Reduzierung. Öffentliche Diskussionen haben diese Technologie größtenteils vernachlässigt. Der weitgehend etablierten, klimafreundlichen und günstigen Technologie könnte durch weitere Integrationsförderung und einer erhöhten Beimischung klimaneutralen Methans zu mehr Akzeptanz verholfen werden.

Als weit in der Zukunft liegende (nach 2030), aber vielversprechende Kraftstoffkandidaten werden **oxygenierte Kohlenwasserstoffe** wie Butanon, Methylfuran, Dimethylcarbonat oder Octanol diskutiert. Diese Kraftstoffkomponenten könnten ebenfalls durch PtL-, BtL- oder StL-Prozesse hergestellt werden und eine langfristig wirtschaftlichere, schadstoffärmere und leistungsstärkere Alternative darstellen. Die Forschungsaktivitäten hierzu sollten beibehalten werden. Zusätzliche Förderung sollte eher in die Entwicklung der kurz- und mittelfristig relevanten Kraftstoffe und Prozesse fließen.

Als **zusammenfassende Bewertung** wird in Power-to-Liquid (PtL) Kraftstoffen das höchste technische Potenzial für nachhaltige, klimaneutrale, motorkompatible und schadstoffarme Kraftstoffe gesehen, die im Zeithorizont bis 2030 großflächig einsetzbar sein könnten. Dieser mögliche Einsatz bedarf jedoch einer kurzfristig verstärkten Forschungs- und Entwicklungsförderung, sowie politischen Maßnahmen zur Förderung der Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit gegenüber fossilen Kraftstoffen und Biokraftstoffen der 1. Generation. Eine Vorreiterrolle Deutschlands würde dabei nicht nur in einem nachhaltigen Verkehrssektor und der Erreichung von Klimaschutzzielen resultieren, sondern mit PtL als innovativer Exporttechnologie den Technologiestandort Deutschland stärken.

Außerdem wird die Förderung und der rasche Einsatz von nachhaltigen Biokraftstoffen der 2. Generation empfohlen, also hydrierte Pflanzenöle, Kraftstoffe aus Biomass-to-Liquid-Verfahren und Cellulose-Ethanol. Diese verwerten bislang ungenutzte Pflanzenreststoffe und können kurzfristig zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen beitragen, ohne in Konkurrenz zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion zu stehen. Die Verfahren stehen an der Schwelle zur kommerziellen Marktreife und können schneller und günstiger als PtL-Produkte eingesetzt werden, die politische Förderung muss hier also vor allem auf die Wettbewerbsfähigkeit abzielen.

Zusätzlich bietet die direkte Nutzung von Sonneneinstrahlung in Form von Sunlight-to-Liquid Kraftstoffen eine hocheffiziente, technisch komplementäre Alternative, die jedoch eher als Exporttechnologie in südlichere Länder interessant ist. Hier wird eine langfristige Förderung auf moderatem Level empfohlen.

Literaturverzeichnis

- Aatola, H., Larmi, M., Sarjovaara, T. und Mikkonen, S. (2009). Hydrotreated vegetable oil (HVO) as a renewable diesel fuel: Trade-off between NO_x, particulate emission, and fuel consumption of a heavy duty engine. *SAE Int. J. Engines*, **1**, 1251-1262.
- Abdalla, A.O.G. und Liu, D. (2018). Dimethyl carbonate as a promising oxygenated fuel for combustion: A review. *Energies*, **11**, 1552.
- Abid, A.D., Heinz, N., Tolmachoff, E.D., Phares, D.J., Campbell, C.S. und Wang, H. (2008). On evolution of particle size distribution functions of incipient soot in premixed ethylene–oxygen–argon flames. *Combust. Flame*, **154**, 775-788.
- Adolf, J., Fehrenbach, H., Fritsche, U. und Liebig, D. (2013). Welche Rolle können Biokraftstoffe im Verkehrssektor spielen? *Wirtschaftsdienst*, **93**, 124-131.
- Agarwal, A.K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Prog. Energy Combust. Sci.*, **33**, 233-271.
- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*.
- Ajjawi, I., Verruto, J., Aqui, M., Soriaga, L.B., Coppersmith, J., Kwok, K., Peach, L., Orchard, E., Kalb, R., Xu, W., Carlson, T.J., Francis, K., Konigsfeld, K., Bartalis, J., Schultz, A., Lambert, W., Schwartz, A.S., Brown, R. und Moellering, E.R. (2017). Lipid production in *Nannochloropsis gaditana* is doubled by decreasing expression of a single transcriptional regulator. *Nat. Biotechnol.*, **35**, 647-655.
- Althaus, H.-J., Füssler, J. und Wunderlich, A. (2017). *Biotreibstoffe in Europa: Heute und Morgen*. Was Tanken wir in Zukunft? Branchentag EV/UP, Zürich, https://heizoel.swiss/images/pdf/Branchentag_2017/4.1_Althaus_Biotreibstoffe_in_Europa_Heute_Morgen.pdf.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2018). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2017*. Im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen bearbeitet von DIW Berlin und EEFA.
- Arteconi, A., Mazzarini, A. und Di Nicola, G. (2011). Emissions from ethers and organic carbonate fuel additives: A review. *Water Air Soil Pollut.*, **221**, 405-423.
- Arvidsson, R., Persson, S., Fröling, M. und Svanström, M. (2011). Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and jatropha. *J. Cleaner Production*, **19**, 129-137.
- Audi AG (2013). *Audi e-gas*. <https://www.audi-technology-portal.de/de/mobilitaet-der-zukunft/audi-future-lab-mobility/audi-future-energies/audi-e-gas> [Zugriff am 28.11.2018].
- Ausfelder, F. und Dura, H.E. (Hrsg.) (2018). *1. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X) - Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien*. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt am Main.
- Awgustow, A., Kuchling, T. und Wollmerstädt, H. (2017). *Herstellung THG-reduzierter flüssiger Kraft- und Brennstoffe*. Kurzstudie erarbeitet durch die TU Bergakademie Freiberg im Auftrag des Instituts für Wärme und Oeltechnik IWO e.V.
- Bae, C. und Kim, J. (2017). Alternative fuels for internal combustion engines. *Proc. Combust. Inst.*, **36**, 3389-3413.
- BDBe (2018). *Bioethanol trifft Mineralöl. Kraftstoff mit Tradition und Zukunft für mehr Klimaschutz im Verkehr*. C₂H₆O. Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e. V., Berlin.

- Bellotti, D., Rivarolo, M., Magistri, L. und Massardo, A.F. (2017). Feasibility study of methanol production plant from hydrogen and captured carbon dioxide. *J. CO₂ Util.*, **21**, 132-138.
- Blei, I. (2014). *Alternative Kraftstoffe im variablen Pkw-Dieselmotor*. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- BMBF (2018a). *Praxistest startet: Forschende recyceln Hüttengase*. Bundesministerium für Bildung und Forschung. <https://www.bmbf.de/de/praxistest-startet-forschende-recyceln-huettengase-6964.html> [Zugriff am 4.12.2018].
- BMBF (2018b). *Siemens und Evonik erforschen im Rheticus-Projekt „grüne“ Chemie*. Bundesministerium für Bildung und Forschung. [https://www.kopernikus-projekte.de/aktuelles/news=Siemens und Evonik erforschen im Rheticus Projekt gruene Chemie](https://www.kopernikus-projekte.de/aktuelles/news=Siemens_und_Evonik_erforschen_im_Rheticus_Projekt_gruene_Chemie) [Zugriff am 14.12.2018].
- BMU (2018). *Schulze und Müller in Katowice: Deutschland verdoppelt Zusage für internationalen Klimafonds*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). <https://www.bmu.de/pressemitteilung/schulze-und-mueller-in-katowice-deutschland-verdoppelt-zusage-fuer-internationalen-klimafonds/> [Zugriff am 12.12.2018].
- BMUB (2016). *Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin.
- Bohl, T., Smallbone, A., Tian, G. und Roskilly, A.P. (2018). Particulate number and NO_x trade-off comparisons between HVO and mineral diesel in HD applications. *Fuel*, **215**, 90-101.
- Boot, M. (Hrsg.) (2016). *Biofuels from Lignocellulosic Biomass - Innovations beyond Bioethanol*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Bourzac, K. (2017). We have the technology. *Nature*, **550**, 66-69.
- Brosowski, A., Adler, P., Erdmann, G., Stinner, W., Thrän, D., Mantau, U., Blanke, B., Mahro, B., Hering, T. und Reinholdt, R. (2015). *Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen - Status quo in Deutschland*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen.
- Carbon Recycling International (2018). *World's Largest CO₂ Methanol plant*. <http://carbonrecycling.is/george-olah/> [Zugriff am 27.11.2018].
- Ceresana (2014). *Marktstudie Butanol*. <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/chemikalien/butanol/marktstudie-butanol.html> [Zugriff am 7.12.2018].
- Cherubini, F. und Strømman, A.H. (2011). Chapter 1 - Principles of Biorefining. In Pandey, A., Larroche, C., Ricke, S.C., Dussap, C.-G. und Gnansounou, E. (Hrsg.), *Biofuels*, Academic Press, Amsterdam, S. 3-24.
- China Daily (2014). *World's first clean diesel additive device debuts in Shandong*. http://www.chinadaily.com.cn/m/shandong/e/2014-12/08/content_19074187.htm [Zugriff am 2.12.2018].
- Cho, H.M. und He, B.-Q. (2007). Spark ignition natural gas engines—A review. *Energy Convers. Manag.*, **48**, 608-618.
- Clariant (2012). *Innovation Spotlight sunliquid®*. <https://www.clariant.com/en/Innovation/Innovation-Spotlight-Videos/sunliquid> [Zugriff am 9.12.2018].
- Clariant (2017). *Sunliquid® 20: Flottentest mit Mercedes-Benz-Fahrzeugen belegt Kraftstoffqualität*. <https://www.clariant.com/de/Corporate/News/2017/02/sunliquid-20-Fleet-test-with-MercedesBenz-vehicles-proves-fuel-quality> [Zugriff am 7.12.2018].

- Clariant (2018). *Spatenstich für die sunliquid® Cellulose-Ethanolanlage von Clariant in Rumänien* <https://www.clariant.com/de/Corporate/News/2018/09/Groundbreaking-for-Clariant-s-sunliquidreg-cellulosic-ethanol-plant-in-Romanian> [Zugriff am 6.12.2018].
- Climeworks (2017). *Climeworks-Anlage in Hinwil: CO₂ aus der Umgebungsluft kurbelt Pflanzenwachstum an.* http://www.climeworks.com/wp-content/uploads/2017/05/02_PM-Climeworks-DAC-Anlage-Case-Study.pdf [Zugriff am 14.12.2018].
- Continental (2017). *Klimaneutral fahren: Continental testet erfolgreich synthetischen Diesel-Ersatzkraftstoff OME.* <https://www.continental-corporation.com/de/presse/pressemitteilungen/2017-08-01-klimaneutral-fahren-92062> [Zugriff am 2.12.2018].
- Crutzen, P.J., Mosier, A.R., Smith, K.A. und Winiwarter, W. (2008). N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 389-395.
- Dahmen, N., Dinjus, E., Kolb, T., Arnold, U., Leibold, H. und Stahl, R. (2012). State of the art of the bioliq® process for synthetic biofuels production. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **31**, 176-181.
- Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Trommler, M., Reinholz, T., Völler, K., Beil, M. und Beyrich, W. (2017). *Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland*. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig.
- Davis, S.J., Lewis, N.S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I.L., Benson, S.M., Bradley, T., Brouwer, J., Chiang, Y.-M., Clack, C.T.M., Cohen, A., Doig, S., Edmonds, J., Fennell, P., Field, C.B., Hannegan, B., Hodge, B.-M., Hoffert, M.I., Ingersoll, E., Jaramillo, P., Lackner, K.S., Mach, K.J., Mastrandrea, M., Ogden, J., Peterson, P.F., Sanchez, D.L., Sperling, D., Stagner, J., Trancik, J.E., Yang, C.-J. und Caldeira, K. (2018). Net-zero emissions energy systems. *Science*, **360**, eaas9793.
- Deutsche Energie-Agentur (2018). *Trendwende bei Neuzulassungen von Pkw mit Gasantrieb.* <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/trendwende-bei-neuzulassungen-von-pkw-mit-gasantrieb/> [Zugriff am 9.12.2018].
- Dietrich, R.U., Albrecht, F. und Pregger, T. (2018). Erzeugung alternativer flüssiger Kraftstoffe im zukünftigen Energiesystem. *Chem. Ing. Tech.*, **90**, 179-192.
- Dimitriou, I., Goldingay, H. und Bridgwater, A.V. (2018). Techno-economic and uncertainty analysis of biomass to liquid (BTL) systems for transport fuel production. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **88**, 160-175.
- Dudenhöffer, F. und Pietron, K. (2010). *Studie "CNG as automotive fuel for Europe/CEE - Is it possible to achieve 5% + x market share for CNG? Necessary steps and actions to achieve?"*. CAR-Center Automotive Research Universität Duisburg-Essen, Duisburg.
- Eberhard, M., Santo, U., Böning, D., Schmid, H., Michelfelder, B., Zimmerlin, B., Günther, A., Weigand, P., Müller-Hagedorn, M., Stapf, D. und Kolb, T. (2018). Der bioliq®-Flugstromvergaser – ein Baustein der Energiewende. *Chem. Ing. Tech.*, **90**, 85-98.
- Edel, M., Kühnel, C. und Reinholz, T. (2017). *Rolle und Beitrag von Biomethan im Klimaschutz heute und in 2050*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin.
- Engman, A., Hartikka, T., Honkanen, M., Kiiski, U., Kuronen, M., Lehto, K., Mikkonen, S., Nortio, J., Nuottimäki, J. und Saikkonen, P. (2016). *Neste Renewable Diesel Handbuch*. Neste Corporation, Espoo.
- Eni (2017). *How Eni is cultivating a strain of algae to be used in biofuel production.* https://www.eni.com/en_IT/innovation/technological-platforms/bio-refinery/algae-biofuel.page [Zugriff am 14.12.2018].

- Esch, T. und Dahlhaus, U. (2016). Antrieb. In Hoepke, E. und Breuer, S. (Hrsg.), *Nutzfahrzeugtechnik*, 8. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 403-540.
- Evonik (2018). *Evonik und Siemens erzeugen aus Kohlendioxid und Ökostrom wertvolle Spezialchemikalien* <https://corporate.evonik.de/de/presse/pressemitteilungen/Pages/news-details.aspx?newsid=72462> [Zugriff am 7.12.2018].
- ExxonMobil (2018). *ExxonMobil and Synthetic Genomics Algae Biofuels Program Targets 10,000 Barrels Per Day by 2025* <https://news.exxonmobil.com/press-release/exxonmobil-and-synthetic-genomics-algae-biofuels-program-targets-10000-barrels-day-202> [Zugriff am 14.12.2018].
- Falter, C., Batteiger, V. und Sizmann, A. (2016). Climate impact and economic feasibility of solar thermochemical jet fuel production. *Environ. Sci. Technol.*, **50**, 470-477.
- Fehrenbach, H., Köppen, S., Markwardt, S. und Vogt, R. (2016). *Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- FNR (2012). *Basisdaten Bioenergie Deutschland August 2012*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen.
- Fountain, H. (2012). *Corn Ethanol Makers Weigh Switch to Butanol*. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2012/10/24/business/energy-environment/weighing-butanol-as-an-alternative-to-ethanol.html> [Zugriff am 7.12.2018].
- Giakoumis, E.G., Rakopoulos, C.D., Dimaratos, A.M. und Rakopoulos, D.C. (2013). Exhaust emissions with ethanol or *n*-butanol diesel fuel blends during transient operation: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **17**, 170-190.
- Gill, S.S., Tsolakis, A., Dearn, K.D. und Rodríguez-Fernández, J. (2011). Combustion characteristics and emissions of Fischer–Tropsch diesel fuels in IC engines. *Prog. Energy Combust. Sci.*, **37**, 503-523.
- Götz, K., Zickmann, S., Fey, B., Bünger, J., Stapf, W., Fan, Z., Garbe, T., Munack, A. und Krahel, J. (2015). *Abschlussbericht zum Projektvorhaben - Diesel R33*. Technologietransferzentrum Automotive der Hochschule Coburg (TAC), Coburg.
- Haas, T., Krause, R., Weber, R., Demler, M. und Schmid, G. (2018). Technical photosynthesis involving CO₂ electrolysis and fermentation. *Nature Catalysis*, **1**, 32-39.
- Härtl, M., Seidenspinner, P., Jacob, E. und Wachtmeister, G. (2015). Oxygenate screening on a heavy-duty diesel engine and emission characteristics of highly oxygenated oxymethylene ether fuel OME₁. *Fuel*, **153**, 328-335.
- Hilgers, M. (2016). *Alternative Antriebe und Ergänzungen zum konventionellen Antrieb*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Hobohm, J., Auf der Maur, A., Dambeck, H., Kemmler, A., Koziel, S., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Wendring, P., Meyer, B., Apfelbacher, A., Dotzauer, M. und Zech, K. (2018). *Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende*. Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ.
- Hoppe, F., Burke, U., Thewes, M., Heufer, A., Kremer, F. und Pischinger, S. (2016a). Tailor-made fuels from biomass: Potentials of 2-butanone and 2-methylfuran in direct injection spark ignition engines. *Fuel*, **167**, 106-117.
- Hoppe, F., Heuser, B., Thewes, M., Kremer, F., Pischinger, S., Dahmen, M., Hechinger, M. und Marquardt, W. (2016b). Tailor-made fuels for future engine concepts. *Int. J. Engine Res.*, **17**, 16-27.

- Hsieh, W.-D., Chen, R.-H., Wu, T.-L. und Lin, T.-H. (2002). Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environ.*, **36**, 403-410.
- Hulkkonen, T., Erkkilä, K., Nylund, N.-O., Tilli, A., Mikkonen, S., Saikkonen, P., Mäki, R. und Amberla, A. (2011). Emission performance of paraffinic HVO diesel fuel in heavy duty vehicles. *SAE Tech. Pap.*, 2011-01-1966.
- Kaltschmitt, M., Drünert, S. und Timmerberg, S. (2017). *Strombasierte Kraftstoffe für den schweren Güterfernverkehr Möglichkeiten und Grenzen*. Hypermotion 2017, Frankfurt am Main, <https://hypermotion-frankfurt.messefrankfurt.com/content/dam/messefrankfurt-redaktion/hypermotion/2017/events/presentation/forum-elektromobilit%C3%A4t-martin-kaltschmitt.pdf>.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. und Hofbauer, H. (Hrsg.) (2016). *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Vieweg, Heidelberg.
- Kaltschmitt, M. und Neuling, U. (Hrsg.) (2018). *Biokerosene - Status and Prospects*. Springer, Berlin.
- Karavalakis, G., Jiang, Y., Yang, J., Durbin, T., Nuottimäki, J. und Lehto, K. (2016). Emissions and fuel economy evaluation from two current technology heavy-duty trucks operated on HVO and FAME blends. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, **9**, 177-190.
- Kerschgens, B., Cai, L., Pitsch, H., Heuser, B. und Pischinger, S. (2016). Di-*n*-buthylether, *n*-octanol, and *n*-octane as fuel candidates for diesel engine combustion. *Combust. Flame*, **163**, 66-78.
- KIT (2018a). *Deutscher Gründerpreis für Kraftstoffe aus Mini-Reaktoren*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). https://www.kit.edu/kip/2018/108_gruenderpreis-fuer-kraftstoffe-aus-mini-reaktoren.php [Zugriff am 14.12.2018].
- KIT (2018b). *Energy Lab 2.0 - The Future Energy System in the Focus*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). https://www.elab2.kit.edu/downloads/Broschue_EL2_2018.pdf [Zugriff am 19.12.2018].
- Kousoulidou, M., Dimaratos, A., Karvountzis-Kontakiotis, A. und Samaras, Z. (2014). Combustion and emissions of a common-rail diesel engine fueled with HWCO. *J. Energy Eng.*, **140**, A4013001.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2018). *Bestand an Pkw in den Jahren 2009 bis 2018 nach ausgewählten Kraftstoffarten*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/b_umwelt_z.html [Zugriff am 13.12.2018].
- Kramer, U., Ortloff, F., Stollenwerk, S. und Thee, R. (2018). *Defossilisierung des Transportsektors - Optionen und Voraussetzungen in Deutschland*. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt am Main.
- Kreyenberg, D., Lischke, A., Bergk, F., Duennebeil, F., Heidt, C., Knörr, W., Raksha, T., Schmidt, P., Weindorf, W., Naumann, K., Majer, S. und Müller-Langer, F. (2015). *Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger*. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima.
- Kugler, U., J. Brokate, C. Schimeczek und S.A. Schmid. (2017). Powertrain scenarios for cars in european markets to the year 2040. In *TAE conference proceedings - 11th International Colloquium Fuels*, Stuttgart.
- Lehmann, T. und Friedrich, E. (2012). Lignozellulosehaltige Substrate - (k)ein Problem für Biogasanlagen? *Landtechnik*, **67**, 114-117.

- Leitner, W., Klankermayer, J., Pischinger, S., Pitsch, H. und Kohse-Höinghaus, K. (2017). Synthese, motorische Verbrennung, Emissionen: Chemische Aspekte des Kraftstoffdesigns. *Angew. Chem.*, **129**, 5500-5544.
- Lischke, A., Windmüller, D., Wurster, R., Weindorf, W., Heidt, C. und Naumann, K. (2015). *Identifizierung von Hemmnissen der Nutzung von LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr sowie Möglichkeiten zu deren Überwindung*. Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima.
- Liu, F.-J., Liu, P., Zhu, Z., Wei, Y.-J. und Liu, S.-H. (2012). Regulated and unregulated emissions from a spark-ignition engine fuelled with low-blend ethanol-gasoline mixtures. *Proc. Inst. Mech. Eng. D*, **226**, 517-528.
- Liu, H., Wang, Z., Li, Y., Zheng, Y., He, T. und Wang, J. (2019). Recent progress in the application in compression ignition engines and the synthesis technologies of polyoxymethylene dimethyl ethers. *Appl. Energy*, **233-234**, 599-611.
- Lynd, L.R., Liang, X., Biddy, M.J., Allee, A., Cai, H., Foust, T., Himmel, M.E., Laser, M.S., Wang, M. und Wyman, C.E. (2017). Cellulosic ethanol: Status and innovation. *Curr. Opin. Biotech.*, **45**, 202-211.
- Manzetti, S. und Andersen, O. (2015). A review of emission products from bioethanol and its blends with gasoline. Background for new guidelines for emission control. *Fuel*, **140**, 293-301.
- Marxer, D., Furler, P., Scheffe, J., Geerlings, H., Falter, C., Batteiger, V., Sizmann, A. und Steinfeld, A. (2015). Demonstration of the entire production chain to renewable kerosene via solar thermochemical splitting of H₂O and CO₂. *Energy Fuels*, **29**, 3241-3250.
- Meisel, K., Braune, M., Gröngroft, A., Majer, S., Müller-Langer, F., Naumann, K. und Oehmichen, K. (2015). *Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Bioethanol*. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig.
- Müller-Langer, F., Dietrich, R.-U., van de Krol, R., Arnold, K. und Harnisch, F. (2017). Erneuerbare Kraftstoffe für Mobilität und Industrie. In *Forschung für die Energiewende - Die Gestaltung des Energiesystems*, Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2016, ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE), Berlin, S. 110-116.
- Napolitano, P., Guido, C., Beatrice, C. und Pellegrini, L. (2018). Impact of hydrocracked diesel fuel and hydrotreated vegetable oil blends on the fuel consumption of automotive diesel engines. *Fuel*, **222**, 718-732.
- Naumann, K., Oehmichen, K., Remmele, E., Thuneke, K., Schröder, J., Zeymer, M., Zech, K. und Müller-Langer, F. (2016). *Monitoring Biokraftstoffsektor - 3. Auflage*. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig.
- Neste (2016). *Putting poor quality waste fats into good use while keeping an eye on algae oil and waste plastic*. <https://www.neste.com/putting-poor-quality-waste-fats-good-use-while-keeping-eye-algae-oil-and-waste-plastic> [Zugriff am 14.12.2018].
- No, S.-Y. (2014). Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines – A review. *Fuel*, **115**, 88-96.
- Pabst, C. (2015). *Wechselwirkungen von Kraftstoffgemischen mit hohem Biogenitätsgehalt am Beispiel eines Motors mit SCR-Abgasnachbehandlung*. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Pang, X., Mu, Y., Yuan, J. und He, H. (2008). Carbonyls emission from ethanol-blended gasoline and biodiesel-ethanol-diesel used in engines. *Atmospheric Environ.*, **42**, 1349-1358.

- Perner, J. und Bothe, D. (2018). *International Aspects of a Power-to-X Roadmap*. A report prepared for the World Energy Council Germany.
- Preuß, J., Munch, K. und Denbratt, I. (2018). Performance and emissions of long-chain alcohols as drop-in fuels for heavy duty compression ignition engines. *Fuel*, **216**, 890-897.
- Prokopowicz, A., Zaciera, M., Sobczak, A., Bielaczyc, P. und Woodburn, J. (2015). The effects of neat biodiesel and biodiesel and HVO blends in diesel fuel on exhaust emissions from a light duty vehicle with a diesel engine. *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 7473-7482.
- REN21 (2018). *Renewables 2018 - Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris.
- Retka Schill, S. und Bailey, A. (2017). *Inside the Cellulosic Industry*. Ethanol Producer Magazine. <http://www.ethanolproducer.com/articles/14479/inside-the-cellulosic-industry> [Zugriff am 6.12.2018].
- Robak, K. und Balcerak, M. (2018). Review of second generation bioethanol production from residual biomass. *Food Technol. Biotechnol.*, **56**, 174-187.
- Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern (2017). *Schwerpunktthema Zellulose-Ethanol*.
- Sahm, H., Antranikian, G., Stahmann, K.-P. und Takors, R. (Hrsg.) (2013). *Industrielle Mikrobiologie*. Springer Spektrum, Berlin.
- Sarathy, S.M. (2016). Fuel Class Higher Alcohols. In Boot, M. (Hrsg.), *Biofuels from Lignocellulosic Biomass Innovations beyond Bioethanol*, Wiley-VCH, Weinheim, S. 29-57.
- Sarathy, S.M., Obwald, P., Hansen, N. und Kohse-Höinghaus, K. (2014). Alcohol combustion chemistry. *Prog. Energy Combust. Sci.*, **44**, 40-102.
- Schemme, S., Samsun, R.C., Peters, R. und Stolten, D. (2017). Power-to-fuel as a key to sustainable transport systems – An analysis of diesel fuels produced from CO₂ and renewable electricity. *Fuel*, **205**, 198-221.
- Schenuit, C., Heuke, R. und Paschke, J. (2016). *Potentialatlas Power to Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin.
- Schmidt, P., Batteiger, V., Roth, A., Weindorf, W. und Raksha, T. (2018). Power-to-liquids as renewable fuel option for aviation: A review. *Chem. Ing. Tech.*, **90**, 127-140.
- Siegemund, S., Trommler, M., Kolb, O., Zinnecker, V., Schmidt, P., Weindorf, W., Zittel, W., Raksha, T. und Zerhusen, J. (2017). *The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin.
- Stengel, B. und Vium, J.H. (2015). *Synthesis, characterization, and use of hydro-treated oils and fats for engine operation*. A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement.
- Sterner, M. und Stadler, I. (2014). *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Vieweg, Berlin.
- Suarez-Bertoa, R., Kousoulidou, M., Clairotte, M., Giechaskiel, B., Nuottimäki, J., Sarjovaara, T. und Lonza, L. (2019). Impact of HVO blends on modern diesel passenger cars emissions during real world operation. *Fuel*, **235**, 1427-1435.
- Sunfire (2017). *Sunfire produces sustainable crude oil alternative*. <https://www.sunfire.de/en/company/press/detail/sunfire-produces-sustainable-crude-oil-alternative> [Zugriff am 27.11.2018].

- Sunfire (2018). *First commercial plant for the Production of Blue Crude planned in Norway*. <https://www.sunfire.de/en/company/press/detail/first-commercial-plant-for-the-production-of-blue-crude-planned-in-norway> [Zugriff am 27.11.2018].
- Tessum, C.W., Hill, J.D. und Marshall, J.D. (2014). Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **111**, 18490-18495.
- Thangavelu, S.K., Ahmed, A.S. und Ani, F.N. (2016). Review on bioethanol as alternative fuel for spark ignition engines. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **56**, 820-835.
- Trindade, W.R.d.S. und Santos, R.G.d. (2017). Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **69**, 642-651.
- Umweltbundesamt (2018a). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016*.
- Umweltbundesamt (2018b). *Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase*. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/emission-der-von-der-un-klimarahmenkonvention> [Zugriff am 13.12.2018].
- VDA (2009). *Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft*. VDA Verband der Automobilindustrie e. V., Frankfurt am Main.
- Voegelé, E. (2018). *Gevo discusses future expansion plans for Luverne plant site*. Ethanol Producer Magazine. <http://ethanolproducer.com/articles/15525/gevo-discusses-future-expansion-plans-for-luverne-plant-site> [Zugriff am 7.12.2018].
- Westphal, G.A., Krahel, J., Munack, A., Rosenkranz, N., Schröder, O., Schaak, J., Pabst, C., Brüning, T. und Bünger, J. (2013). Combustion of hydrotreated vegetable oil and jatropha methyl ester in a heavy duty engine: Emissions and bacterial mutagenicity. *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 6038-6046.
- Wietschel, M., Plötz, P., Klobasa, M., Müller-Kirchenbauer, J., Kochems, J., Hermann, L., Grosse, B., Nacken, L., Küster, M., Naumann, D., Kost, C., Fahl, U., Timmermann, D. und Albert, D. (2018). Sektorkopplung – Was ist darunter zu verstehen? *Z. Energiewirtsch.*, <https://doi.org/10.1007/s12398-018-0241-3>.
- Xie, X., Wang, M. und Han, J. (2011). Assessment of fuel-cycle energy use and greenhouse gas emissions for Fischer–Tropsch diesel from coal and cellulosic biomass. *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 3047-3053.
- Xu, X., Liu, Y., Zhang, F., Di, W. und Zhang, Y. (2017). Clean coal technologies in China based on methanol platform. *Catal. Today*, **298**, 61-68.
- Zech, K., Naumann, K., Müller-Langer, F., Schmidt, P., Weindorf, W., Mátra, Z., Grimme, W., Hepting, M. und Heidt, C. (2014). *Drop-In-Kraftstoffe für die Luftfahrt*. Studie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima.